LA ESCUELA DEL RADIOTÉCNICO

EDITORIAL LABOR, S. A.
BARCELONA - MADRID

LA ESCUELA DEL RADIO-TÉCNICO

II





1.200.

4 Vols.

LA ESCUELA
DEL
RADIOTÉCNICO

TOMO II

Cine sonoro
Reproducción

LA ESCUELA DEL RADIOTÉCNICO

ENCICLOPEDIA PRÁCTICA DE RADIOTECNIA APLICADA

PUBLICADA BAJO LA DIRECCIÓN

DE

JOAQUÍN SÁNCHEZ-CORDOVÉS
Ingeniero de Telecomunicación

TOMO II



EDITORIAL LABOR, S. A.
BARCELONA - MADRID - BUENOS AIRES - RIO DE JANEIRO
1949

CINE SONORO

REPRODUCCIÓN

POR

E. A. GIL SANTIAGO
Licenciado en Ciencias Físicas
Ingeniero de Telecomunicación e Ingeniero Inspector
de Western Electric Co. of Spain en Madrid

Con 389 figuras



EDITORIAL LABOR, S. A.
BARCELONA - MADRID - BUENOS AIRES - RIO DE JANEIRO
1949

PRINTED IN SPAIN

TALLERES GRÁFICOS MARIANO GALVE - CARMEN, 16 - BARCELONA

Prólogo

Desde que, por circunstancias especiales, me he visto en la obligación de atender y dar servicio a los equipos de reproducción cinematográfica en España, he percibido claramente la necesidad en que se encontraban los técnicos de esta especialidad de tener a su alcance una obra en la que se abordasen los problemas más salientes de aquellos equipos, tanto en la parte óptica como en la sonora, y en la que estuviesen expuestos los distintos fenómenos y principios científicos del funcionamiento de sus distintos órganos, y ello de un modo sistemático y no meramente descriptivo. No existe en español, al menos que yo sepa, un libro o manual orientado en tal sentido; en general, la mayoría de ellos atienden casi exclusivamente el segundo aspecto, es decir, el sonoro, y en su totalidad son más bien catálogos con fotografías en abundancia, en los que se describen con excesivo detalle este o el otro aparato, pero sin dar las razones físicas de su funcionamiento, ni tener el libro la unidad requerida en su conjunto. En cuanto a obras extranjeras, si bien las hay excelentes en cuanto al aspecto sonoro y al registro, no conocemos ninguna que abarque por igual los dos aspectos ya citados.

En esta obra he procurado prescindir de los detalles de cualquier tipo especial, dando, en cambio, las características técnicas que deben reunir todos ellos en razón del trabajo que en su conjunto han de desarrollar para conseguir una reproducción de calidad en sus dos aspectos.

Evidentemente, un libro orientado en tal sentido tendrá para los operadores sin una cierta base elemental, las mismas dificultades que cualquier manual de Radio; no es posible, por más esfuerzos que se hagan, eliminar por completo el uso de la matemática más elemental, nudo gordiano de las dificultades que en esto, como en Radio, encuentran muchos principiantes; las leyes que rigen los fenómenos de ambos tipos son relaciones cuantitativas entre varias magnitudes (en su gran mayoría), y tales relaciones no pueden expresarse más que mediante relaciones entre números, que son las medidas de tales magnitudes. Sin embargo, el empleo de las matemáticas se ha reducido

al mínimo, con el fin de poner el libro al alcance del mayor número posible de personas, y al nivel de cualquier manual elemental de Radio que tenga pretensiones serias. Mucha información contenida en este libro procede del J. S. M. P. E., varias obras de Radio, las de Eggert-Schmith, Knundsen, Olson y Massa, etc., y del libro de conferencias de la Academia de Ciencias y Artes de Cinematografía, especialmente para cuestiones de sonido. El autor se ha limitado a coordinar y dar unidad a todos estos elementos, dispersos en una multitud de publicaciones, de modo a hacer la obra apta para principiantes en esta técnica, que tengan nociones físicas básicas, algunas de las cuales se han procurado resumir a su debido tiempo y cuando la ocasión lo ha pedido; sin embargo, algunas aportaciones originales se han hecho por el autor, entre las que figuran como más prominentes: el estudio del parpadeo, el de la doble obturación en forma elemental, el estudio del *flutter*, en una cierta medida, la introducción de la válvula virtual, el estudio de la línea de transmisión, en cuanto determina la frecuencia de corte, y todo el Capítulo XXI.

He procurado, siempre que se me ha presentado la ocasión, dar datos *standard* referentes a películas, calibres, tiempos de arranque, etc., que no aparecen corrientemente en las obras de Cine en castellano, y también hacer referencia a los equipos de 8 y 16 mm; especialmente los últimos adquieren cada día un desarrollo más amplio, y en el aspecto de la proyección superan a veces a los normales de 36 mm, debido principalmente a su óptica más rápida y a su sistema intermitente más eficaz, menos inerte y más versátil.

Dadas las complicaciones surgidas en nuestro país desde 1936, acrecentadas con el conflicto mundial, que todavía no han permitido normalizar el intercambio de revistas técnicas y científicas, en muchos aspectos me he visto privado de literatura moderna, de modo que sólo en algunos puntos puede decirse que la obra esté al día, con respecto al país que lleva el timón en esta técnica; sin embargo, su lectura resultará muy modernizada en relación a las obras corrientes en el mercado, y en algunos ángulos se reflejan las tendencias actuales, posteriores al conflicto mundial.

En un libro de tal naturaleza son inevitables, sobre todo en esta primera edición, y por mucho cuidado que hemos puesto, algunos errores en curvas, valores numéricos, ecuaciones, etc. El autor agradecerá cordialmente se le comuniquen, cuando sean encontrados, para su corrección en próximas ediciones, si ésta tiene el éxito esperado.

Quedan algunos aspectos que ni siquiera han sido esbozados, como el cine en relieve y el estereofónico, el cine a altas velocidades y las aplicaciones a rayos X, y en conexión con el oscilógrafo de rayos catódicos; el primero no ha pasado todavía de los ensayos, el segundo no ha logrado hacerse comercial, aunque ha tenido realizaciones muy logradas, y en cuanto a los demás, hubieran dilatado excesivamente la obra, ya voluminosa, sin contribuir en gran medida a la finalidad pri-

mordial de la misma; quizás en la obra de Registro o en otra edición posterior puedan tener cabida.

No puedo silenciar la ayuda prestada al autor por Western Electric Co. of Spain, cuyo director, señor De Rénzis, y director técnico, señor Rodríguez Sanz, L., han puesto amablemente a mi disposición cuanta información les ha sido posible sobre aspectos modernos y predominantes de la reproducción sonora y me han ayudado generosamente con sus consejos y orientaciones, hasta el punto de que puedo con todo énfasis decir que este libro hubiera perdido la mayoría de su valor sin aquella ayuda; el autor se complace en dar las gracias a ambos. También debo homenaje de gratitud a mi antiguo profesor de la Facultad de Ciencias de Madrid, don Julio Palacios, que me ha ayudado poderosamente en el desarrollo del Capítulo XXI, uno de los más interesantes, por falta de literatura española en el aspecto de Acondicionamiento de aire de locales.

Finalmente, he de mencionar mi agradecimiento a mi esposa y a mi hijo E. Gil Rodríguez, así como a mi buen amigo el dibujante F. Benaiges, que me han ayudado respectivamente en la corrección de las pruebas y en la ejecución de algunos dibujos, y a la Editorial Labor por el esmero que ha puesto en la confección de esta obra.

E. A. Gil Santiago

La Coruña, enero de 1946.

Índice de materias

TABLA DE SÍMBOLOS

La página indicada a la derecha de cada concepto es aquella donde se define el significado de la letra o donde se emplea por primera vez

		Págs.
A	Equivalente mecánico del calor	590
Å	Unidad Angstron	10
$A_{\text{por cm.}^2}$	Amperios por centímetro cuadrado	55
A_{af}	Amplificación de altas frecuencias	416
A_{bf}	Amplificación de bajas frecuencias	415
$A_{\text{máx}}$	Amplificación máxima	416
A_o	Amplitud de una onda modulada	314
AN	Apertura numérica	300
a	Amplitud del movimiento sinusoidal	1
a	Base acústica del hombre	215
a	Trabajo de emisión de un electrón	326
a_1	Coeficiente de radiación del aire exterior	584
a_2	Coeficiente de radiación del aire interior	584
a_i	Coeficiente de absorción de S_i	559
B	Brillo en bujías por pie cuadrado	18
B	Densidad de flujo magnético	503
BTU/lb	Unidad térmica de calor por libra de peso	590
C	Capacitancia mecánica	503
C	Número de unidades de cruce aparente	374
C_1	Capacidad de acoplo de célula	415
$C_{\mu f}$	Capacidad en microfaradios	438
c	Velocidad del sonido	504
D	Diámetro del objetivo	153
D	Densidad óptica	268
D	Transparencia	352
D	Porcentaje de armónicos	366
D	Factor de deformación	398
D	Desnivel de potencia en decibelios	405
D	Término de deformación	537
D_{dB}	Factor de deformación expresado en dB	398
d	Diámetro del pistón equivalente	509
d	Espesor de un vidrio	23
E	Brillo intrínseco del foco	15
E	Energía sonora al cabo de un tiempo t	558
E_a	Tensión de salida	335
$E_{\text{bujías/cm.}^2}$	Brillo intrínseco del foco en bujías por centímetro cuadrado	18
E_c	Tensión compuesta	349
$\overline{E_F^2}$	Tensión cuadrática media por bombardeo electrónico	343
E_g	Tensión continua de rejilla	349
E_o	Energía sonora en régimen permanente	558
E_p	Tensión continua de placa	349
$\overline{E_T^2}$	Tensión cuadrática media de agitación térmica	343

		Págs.
e	Tensión alterna de rejilla.	357
e_g	Tensión de excitación ..	537
e_g	Tensión alterna en rejilla.	335
$e_{culombios}$	Carga eléctrica del electrón en culombios ...	325
F	Constante de saturación.	343
$°F$	Grados Farenheit	590
F_{dinas}	Fuerza en dinas	324
f	Frecuencia	3
f	Distancia focal objeto...	30
f'	Distancia focal imagen..	39
f_c	Distancia focal para λc..	39
f_c	Frecuencia de la corriente alterna	92
f_d	Distancia focal para λ_D.	39
f_F	Distancia focal para λ_F.	39
f_m	Fuerza en dinas	503
f_m	Frecuencia auxiliar	450
f_s	Frecuencia auxiliar	386
f_o	Frecuencia de obturación	92
f_1	Frecuencia límite de banda	343
f_2	Frecuencia límite de banda	343
G_{dB}	Ganancia en decibelios..	409
g_m	Transconductancia o conductancia mutua.....	335
g_m'	Transconductancia virtual	359
H octavas	Intervalo musical en octavas	213
H_r	Humedad relativa del aire	587
h	Entalpia	590
I	Intensidad del foco	16
I	Corriente en el circuito perturbador	374
I_a	Corriente de ánodo	335
I_a	Componente continua de la corriente de ánodo.	343
$I_{máx.}$	Intensidad máxima	339
$I_{mín.}$	Intensidad mínima	339
I_p	Corriente de ánodo	348
I_p	Corriente espacial	348
I_p'	Corriente de pantalla ...	354
I_o	Intensidad en el punto de funcionamiento	339
i	Corriente en el circuito perturbado	374
i	Valor instantáneo de la corriente en amperios.	503

		Págs.
i^1	Corriente fotoeléctrica...	330
i	Ángulo de incidencia ...	21
i_p	Corriente alterna de ánodo	354
J	Julios	343
J_1	Intensidad de la onda 1.	208
J_2	Intensidad de la onda 2.	208
$J_1(2kR)$	Función de Bessel de argumento 2kR	504
K	Constante de Boltzman.	343
K	Constante geométrica...	348
K	Factor de potencia	365
K	Coeficiente de conductibilidad calorífica	584
$°K$	Grados Kelvin de temperatura	12
k	Relación de las corrientes en la carga, antes y después de la inserción..	393
k %	Porcentaje de reducción de la amplitud de una onda sonora	561
k	Constante de absorción del vidrio	23
L_{dB}	Nivel en decibelios	208
L_{nepers}	Nivel en nepers	208
L_i	Luz incidente	268
L_t	Luz transmitida	268
l	Longitud de hilo de la bobina móvil	503
l_e	Calor latente de vaporización	590
log	Logaritmo decimal	363
M	Masa molecular de un gas	591
M_ω	Factor de deformación por defasaje	403
m	Masa efectiva	503
m	Coeficiente de crecimiento de una bocina exponencial	514
m	Masa específica del vapor de agua	587
m	Masa del electrón	325
$m_{máx}$	Masa de vapor de agua en aire saturado	587
N	Nivel sonoro a una determinada frecuencia.	564
N_{nepers}	Desnivel expresado en nepers	373
N_r	Lecturas en decibelios del indicador de volumen.	369

		Págs.
N_p	Número de vueltas del primario de un transformador	368
N_s	Número de vueltas del secundario	368
n_c	Índice del vidrio para λ_C	39
n_D	Índice del vidrio para λ_D	39
n_{dB}	Número de decibelios	365
n_F	Índice del vidrio para λ_F	39
O	Opacidad	268
P_A	Presión en el punto A	206
P_B	Presión en el punto B	206
$P. I.$	Pérdidas de inserción	392
P_r	Pérdidas por reflexión	382
P_r	Punto de rocío	579
P_i	Pérdida caracterizada por el subíndice i	368
P_s	Tensión de saturación	587
P_v	Tensión del vapor de agua	587
p	Recorrido libre medio de las moléculas de aire	559
p	Amplitud de la presión sinusoidal de aire	206
p	Abscisa del objeto	30
p'	Abscisa de la imagen	30
P_o	Presión en el punto de reposo	206
Q	Calor a través de una pared en calorías	584
Q	Presión sonora en la dirección α, referida a la del eje	509
Q_r	Factor de almacenamiento de una bobina	437
R	Factor de reflexión o albedo	18
R	Radio del espejo	32
R	Radio del pistón	504
R	Constante de los gases perfectos	591
R_o	Resistencia de carga	476
R_1	Resistencia de carga en la célula	341
R_2	Resistencia de acoplo de la célula	415
$R_a(f)$	Respuesta actual de un sistema	434
$R_d(f)$	Respuesta deseada de un sistema	434
R_e	Componente resistiva de Ze	381
R_g	Resistencia del generador	476
R_i	Componente resistiva de Zi	381
$R_i(f)$	Respuesta del igualador	434
R_i	Resistencia interior	335
r	Distancia foco pantalla	15
r	Ángulo de refracción	21
r	Factor de reflexión	381
r	Resistencia de la línea	476
S	Superficie receptora de luz	15
S	Superficie total de la sala	559
S_e	Sensibilidad estática de la célula	334
S_d	Sensibilidad dinámica de la célula	335
S_{m^2}	Superficie en metros cuadrados	16
S_{pies^2}	Superficie en pies cuadrados	16
S_v	Sensibilidad en tensión	335
s	Superficie de la pared transmisora de calor	584
s	Superficie del foco emisor	15
T	Transparencia de la película	268
T	Período del movimiento	206
T	Temperatura en grados Kelvin	591
T	Tiempo en horas	584
T_h	Temperatura del termómetro húmedo	579
T_s	Temperatura del termómetro seco	579
t	Tiempo	4
t_1	Temperatura del aire exterior	584
t_2	Temperatura de la sala	584
U, A	Unidad Angstron	39
U'	Ángulo de abertura	40
U_a	Tensión de ánodo	335
U_a	Tensión de salida	537
u	Energía interna	590
u_1	Velocidad de la onda 1	208
u_2	Velocidad de la onda 2	208
V	Voltios	56
V	Volumen de la sala	559
V_o	Tensión medida en el indicador de volumen	368

		Págs.
V_i	Tensión en el punto 1 ...	325
V_c	Indicación del medidor de salida en la carga..	368
V_p	Tensión de ánodo	348
v	Velocidad del electrón..	325
v	Velocidad instantánea del sistema vibrante	503
	Velocidad de propagación	6
v_a	Velocidad de la luz en el agua	19
v_c	Velocidad de la luz en el vidrio	19
v_g	Tensión de entrada	537
v_n	Velocidad normal de la película	93
v_p	Velocidad real de la película	93
W	Vatios	363
W_1	Potencia caracterizada por el subíndice 1 ...	363
W_{fr}	Potencia cedida al altavoz en la resonancia .	508
W_{zL}	Potencia disipada en Z_L.	383
X_e	Componente reactiva de Ze	381
X_L	Componente reactiva de Z_L	381
x	Factor de homogeneidad.	189
y	Dimensión del objeto...	30
y'	Dimensión de la imagen.	30
Z	Impedancia mecánica...	503
Z_a	Impedancia de carga ...	335
Z_a	Impedancia combinada.	341
z-o	Tiempo medio entre dos reflexiones consecutivas	558
Z_c	Impedancia cátodo placa	360
Z_{c1}	Impedancia de cortocircuito a la salida cuadripolo	391
Z_{c2}	Impedancia de cortocircuito a la salida cuadripolo	391
Z_e	Impedancia interna de un generador	381
Z_g	Impedancia rejilla cátodo	360
Z_L	Impedancia de carga de ánodo	358
Z_{v1}	Impedancia vacío de entrada de cuadripolo ..	391
Z_{v2}	Impedancia vacío de salida de cuadripolo ...	391
Z_m	Impedancia de movimiento	503
Z_{12}	Impedancia de salida del circuito equivalente ..	360
α	Coeficiente de dilatación de los gases	587
α	Ángulo de una dirección fija con el eje del pistón	509
α_1	Lectura del fotómetro en la pantalla, punto 1...	189
α_2	Lectura del fotómetro en la pantalla, punto 2..	189
α_3	Lectura del fotómetro en la pantalla, punto 3...	189
β_1	Lectura del fotómetro en la pantalla, punto 1...	189
β_2	Lectura del fotómetro en la pantalla, punto 2...	189
β_3	Lectura del fotómetro en la pantalla, punto 3...	189
β	Ángulo de fase	401
β	Factor de espiras	494
β	Factor de realimentación	537
$\Delta\nu$	Error de apreciación de frecuencia	213
Δt	Intervalo de observación.	213
δ	Diferencia de marcha...	553
δ	Densidad del vapor de agua	587
δ	Poder reparador	41
δ'	Radio de la primera mancha de difracción.....	40
ε	Distancia aparente entre dos puntos	41
η	Rendimiento de la línea.	476
η	Factor de impedancia...	493
λ	Longitud de onda......	3
λ_C	Longitud de onda raya roja del hidrógeno ...	39
λ_F	Longitud de onda raya azul del hidrógeno	39
μ	Micron	10
μ	Factor de amplificación en voltios	351
μA	Microamperios	352
μV	Microvoltios	335
μW	Microvatios	404
μ mhos.	Micromhos	352

		Págs.
ν	Frecuencia de la luz incidente	326
ν	Inversa poder dispersivo vidrio	39
ν_1	Frecuencia del tono 1	213
ν_2	Frecuencia del tono 2	213
ν_o	Frecuencia límite del efecto fotoeléctrico	326
$\varrho_{\text{lamberts}}$	Densidad en lamberts	18
ϱ	Densidad del aire	504
σ	Densidad de iluminación.	16
$\sigma_{\text{bujías metros}}$	Densidad en *bujías metros*	16
σ_{fotos}	Densidad en *fotos*	16
σ_{lux}	Densidad en lux	16
τ	Período	3
τ	Tiempo de reverberación.	559
Φ	Flujo de luz	15
Φ_{lumens}	Flujo en lumens	16
Φ	Diámetro del carbón	66
Φ	Ángulo de inclinación de un frente de ondas	215
Φ	Índice de modulación	315
Φ	Diferencia de ángulos φg y φr de fase	384
Φ_a	Flujo de luz incidente	335
φ	Ángulo de fase	3
φ_g	Ángulo de fase de Zg	383
φ_L	Ángulo de fase de Z_L	383
Ω	Ángulo sólido	15
Ω_o	Máximo de ω_o	315
Ω	Ohmios	368
ω	Pulsación	2
ω_o	Pulsación de corte	341
ω_c	Pulsación de corte	415
ω_r	Pulsación de resonancia.	450
ω_m	Pulsación moduladora	314
ω_o	Pulsación de la portadora	314

I. Nociones de Óptica

Movimiento oscilatorio. Además del movimiento circular uniforme hay otro tipo de movimiento que tiene mucho interés estudiar, porque mediante él vamos a poder darnos cuenta de lo que representa tanto el sonido como la luz (que son las dos formas de la energía de que nos valdremos, además de la electricidad, para la reproducción de las escenas en el cine), y, asimismo, para investigar multitud de fenómenos que se presentan en las máquinas de cine. Este tipo de movimiento se llama también *sinusoidal*, porque, como veremos, sigue la ley de una sinusoide: $y = \text{sen } x$ (fig. 1).

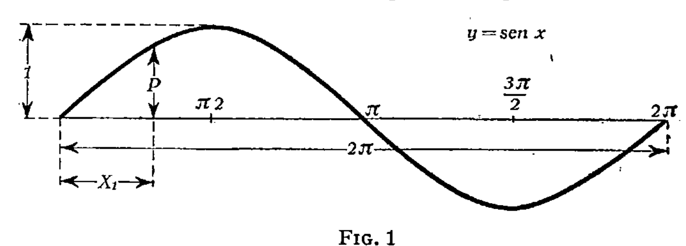


FIG. 1

Supongamos que en la función sinusoidal que acabamos de indicar, x representa el tiempo durante el cual un móvil se encuentra en movimiento e y representa el espacio recorrido durante ese tiempo; diremos entonces que el movimiento es sinusoidal o *vibratorio*, porque este tipo de movimiento es el que tiene cada uno de los puntos de una varilla elástica vibrante sujeta por un extremo, cuando se separa de su posición el otro extremo y se abandona a sí misma. Sin embargo, en la práctica y para los casos que hemos de utilizar, no es la expresión anterior la que interesa, sino varias generalizaciones sucesivas que, para su mejor comprensión, vamos a dar.

a) Es el caso de ser

$$y = a \cdot \text{sen } x;$$

la representación gráfica de este caso se obtiene, a partir de la sinusoide anterior (fig. 1), sin más que multiplicar sus ordenadas por a;

así, si, como en la figura 2, $a = 3$, bastará ir tomando diversos puntos x_1 en la sinusoide y en el sistema de ejes en que vamos a construir la curva, y para cada punto tomar su ordenada $p' = 3\ p$, igual a tres

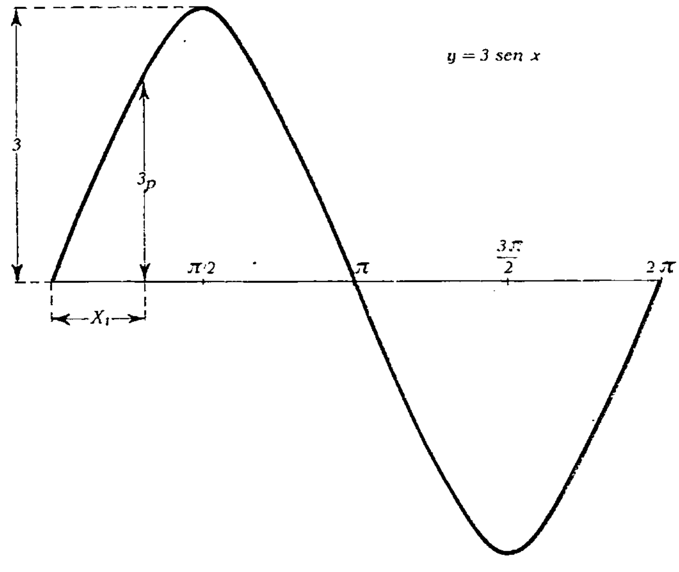


Fig. 2

veces la ordenada correspondiente en la sinusoide; así se ha construído la curva de la figura 2. Mientras que antes la amplitud máxima, es decir, el mayor valor que podía tomar y, era, en la figura 1, la unidad aquí será a, o, en el ejemplo que hemos dibujado, precisamente 3; es como si todas las ordenadas de la sinusoide se hubieran dilatado o multiplicado por 3.

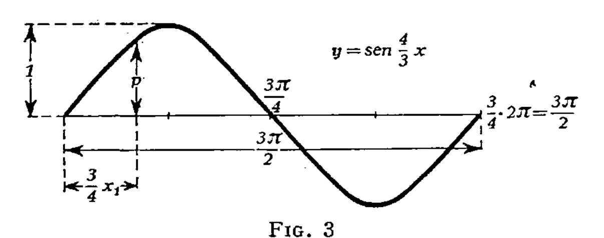


Fig. 3

b) Es el caso de que

$$y = \text{sen}\ \omega x,$$

la cual puede dibujarse a partir de la misma figura 1, sin más que dividir por ω las abscisas de ella, y en cada nueva abscisa $x' = x/\omega$ tomar igual ordenada; así, por ejemplo, para $y = \text{sen}\ 4/3\ x$, tomaremos (fig. 3), para cada abscisa x_1, su correspondiente $3/4\ x_1$, y la misma ordenada en ambas curvas. Claro está que cuanto mayor sea ω, tanto menor será el espacio ocupado por toda la curva que se corresponde con $2\ \pi$, el cual vale ahora $2\ \pi/\omega$, y, lo mismo que antes, se le llama *período* y se

designa por τ, ya que si sigue aumentando x más allá de este valor, la curva se repite.

Se tiene, pues,

$$\frac{2\pi}{\omega} = \tau = \frac{3\pi}{2}$$

Si x representa el tiempo, entonces, dividiendo 1 segundo por el período, tendremos el número de los que hay en 1 segundo, es decir, lo que se llama *frecuencia;* de modo que, designando a ésta por f, se tendrá

$$f = s/f = \omega/2\pi,$$

y de aquí,

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{\tau}$$

Si, por el contrario, x representa una longitud o espacio, entonces la magnitud $2\pi/\omega = \lambda$ se llama *longitud de onda,* porque representa la distancia o separación entre dos puntos en los que la magnitud y toma el mismo valor.

c) En caso de ser

$$y = a \cdot \text{sen}\ \omega x,$$

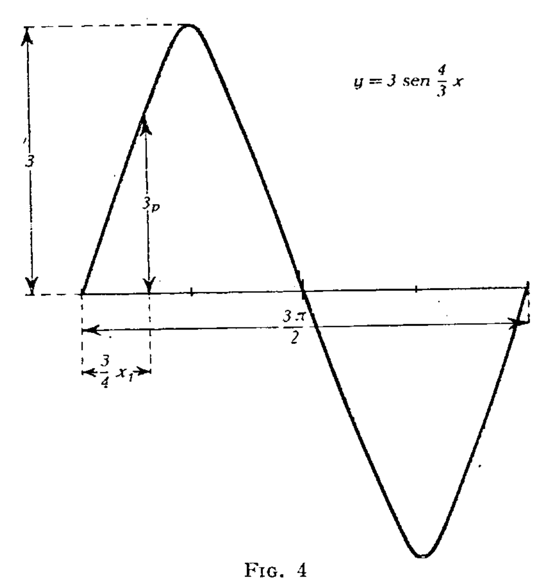


FIG. 4

puede obtenerse (fig. 4) también a partir de la sinusoide aplicando simultáneamente los dos sistemas anteriores, o bien sucesivamente pasando de la figura 1 a la figura 2 y de ésta a la final, siguiendo sobre ella el sistema que se usó para construir la figura 3.

Observación. En todos los casos anteriores hemos suspuesto que empezábamos a medir o contar la magnitud y a partir del momento en el cual x valía cero, es decir, que los orígenes de ambas magnitudes x e y se corresponden; pero puede suceder que no sea así y que comencemos a contar y cuando ya x ha alcanzado un cierto valor, 5, por ejemplo; entonces, si tomamos la última expresión como más completa, tendremos que descontar de x las 5 unidades ya transcurridas, de modo que esa expresión deberá ser escrita así:

$$y = a \text{ sen } \omega (x - 5) = a \text{ sen } (\omega x - 5\omega) = a \text{ sen } (\omega x - \varphi);$$

y a esta cantidad $\varphi = 5\omega$, que permanece fija durante todo el movimiento, se le llama ángulo de fase o simplemente *fase.*

La expresión, pues, más completa de esta clase de movimientos, poniendo de manifiesto el período si $x = t$ representa el tiempo, será

$$y = a \text{ sen } (\omega t - \varphi) = a \text{ sen}\left(\frac{2\pi}{\tau}\, t - \varphi\right) \qquad (\alpha)$$

mientras que si x representa una distancia, poniendo de manifiesto la longitud de onda,

$$y = a \text{ sen } (\omega x - \varphi) = a \text{ sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\, x - \varphi\right) \qquad (\beta)$$

en ambos casos, al número ω se le llama *pulsación*.

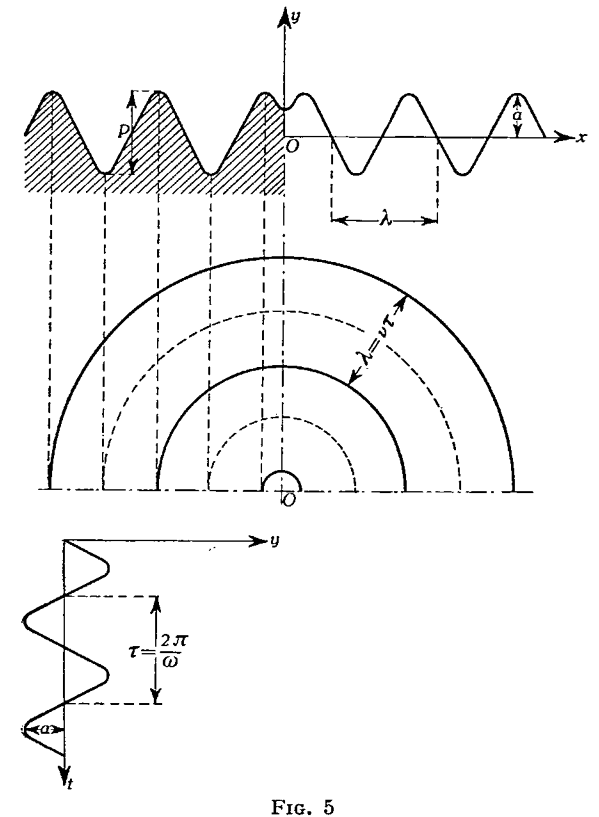


Fig. 5

Propagación de ondas. Vamos a darnos cuenta de lo que estas dos expresiones significan en un caso concreto muy intuitivo, para lo que de momento introduciremos la condición $\varphi = o$ en ambas, que, como ya hemos visto, sólo depende del momento en que se empiezan a contar los tiempos o las distancias.

Todos hemos observado lo que sucede cuando en la superficie tranquila de un estanque se deja caer una piedra en un punto O de la superficie; se producen una serie de círculos concéntricos, que van creciendo de radio y se van alejando del punto donde cayó la piedra, al mismo tiempo que otros van *manando* de dicho punto; estos círculos que vemos son las sombras de unas crestas que se forman en dicha superficie. Aun cuando lo que digamos sólo vale en primera aproximación (pues las cosas son bastante más complicadas), supongamos que en un instante cualquiera todo queda paralizado, y que, como si fuera un cuerpo sólido, cortamos con un cuchillo verticalmente por un plano

que pase por el punto donde cayó la piedra; la figura 5 nos da una imagen de frente y por el corte de lo que se obtendría en tal caso; como se ve, los puntos de la superficie libre ya no están en un plano sino que están en una sinusoide del tipo de la representada por *c)*; es decir, a lo largo de un radio cualquiera que pase por los puntos de la superficie se han situado, *en cada instante* que nosotros consideremos la cuestión, sobre la curva representada por la expresión *c)*, si tomamos las x contadas a partir del centro en la dirección de un radio, y las y verticalmente según una recta que pasa por aquel centro. Dos puntos que se encuentren en el mismo estado de movimiento estarán separados entre sí por una distancia mínima λ. Vemos, pues, que, en este caso, y representa las desviaciones de los distintos puntos (para cada valor de x se tiene un punto) de la posición que tenían cuando el agua estaba en reposo o posición de equilibrio. Como el corte lo hemos hecho arbitrario, lo mismo sucederá en cualquier otro radio, y claro está que entonces todos los puntos situados en la misma circunferencia de centro O tienen la misma desviación de su posición de reposo; se dice que todos se encuentran en la *misma onda*, mientras que el conjunto de los que se encuentran en la dirección de uno de aquellos radios forman lo que se llama un *rayo*.

¿Qué observamos si en lugar de suponer paralizado el líquido nos fijamos en lo que le sucede a un punto *fijo* o *determinado* en la superficie del agua, cuando pasa el tiempo, y suponiendo efectuado el corte de antes? En primer lugar, el punto no cambia de posición en el sentido del radio, lo que se comprueba fácilmente dejando caer un pequeño trozo de papel en ese punto y viendo que su distancia al lugar donde se arrojó la piedra permanece sensiblemente invariable. En segundo lugar, este punto se mueve verticalmente por encima y debajo de su posición de reposo, pero no de una manera arbitraria, sino que en el transcurso del tiempo podemos representar las posiciones del punto P mediante la parte inferior de la figura 5, en la que el eje t representa los valores sucesivos del tiempo, y el eje y representa las desviaciones que en cada instante tiene el punto P, con relación a la posición de equilibrio, cuando la superficie estaba tranquila; en definitiva, la ley del movimiento *de cada punto* de la superficie del agua *en el transcurso del tiempo* vendrá dada, según hemos visto, por la ley

$$y = a \text{ sen } \frac{2\pi \cdot t}{x};$$

y claro está que el período τ, como se deduce de la figura y de los razonamientos anteriores, valdrá $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$. La diferencia que hay entre las dos representaciones de movimiento oscilatorio de la figura 5, es que mientras la de la parte superior *tiene existencia real en cada instante* y se refiere a *todos* los puntos de un rayo en la superficie libre, la de la parte inferior es sólo una representación gráfica (sin existencia en la

superficie del líquido) para darnos cuenta de cómo varían las posiciones de *un solo punto P* cualquiera de la superficie, en el transcurso del tiempo.

Antes vimos que los círculos-crestas, que convinimos en llamar ondas, iban aumentando de radio y, por consiguiente, alejándose del centro, y después hemos dicho que ninguna de las moléculas del líquido se desplaza en sentido radial, sino que se mueve por encima y por debajo de la superficie libre del líquido en reposo; en definitiva: lo que sucede es que *todos* los puntos de la superficie del agua tienen movimiento sinusoidal según una dirección vertical o normal al plano del líquido, pero para los puntos o moléculas del agua situados en un rayo, es decir, en una dirección radial, la altura máxima sobre la superficie, o sea la cresta, va siendo tomada sucesivamente por los puntos o moléculas, según va aumentando su distancia del punto donde cayó la piedra; es, pues, esa *cresta* (y, por consiguiente, el estado de movimiento, ya que las crestas no juegan otro papel en el movimiento que hacerse visibles) lo que se *propaga* en dirección radial de una a otra molécula de las situadas en cada radio, y a este tipo de propagación se le llama *propagación por ondas transversales*, ya que cada molécula se mueve en dirección normal a la de propagación entre las distintas moléculas de un rayo.

La expresión analítica más sencilla para indicar este tipo de propagación por ondas (se trata de ondas planas, pero los resultados a que nos referimos son generales) es

$$y = a \text{ sen } \omega \left(t - \frac{x}{v}\right), \qquad (\gamma)$$

en la que todas las letras tienen ya significado conocido salvo la letra v, que representa la velocidad con la cual caminan esas crestas por la superficie del agua; esto es, lo que se llama *velocidad de propagación de la onda* producida por la piedra. Para darnos cuenta de que efectivamente esta ecuación representa la propagación del movimiento de unas moléculas a otras, en la dirección del rayo, y precisamente con la velocidad v, observemos, en primer lugar, que ella está contenida en las dos anteriores (α) y (β), que dimos antes; en efecto, en un instante fijo, o, lo que es lo mismo, poniendo en la expresión (γ) la hora que en ese momento marque nuestro reloj, por ejemplo, las 12 horas, la ecuación se transforma en la (β), $y = a \text{ sen } \omega \left(12 - \frac{x}{v}\right)$, que sólo varía con x y sirve, por tanto, perfectamente para representar el estado de movimiento de todas las moléculas del rayo. Si, por el contrario, elegimos un determinado punto de la superficie del agua, que, dentro de su radio, está caracterizado por su abscisa x; es decir, si medimos su distancia al centro o, por ejemplo, 14,5 cm, y este valor lo llevamos a la expresión (γ), la y sólo variará ahora con t, o sea, sólo cambiará cuando cambie el tiempo, y será equivalente a la (α) y apta, por consiguiente, para representar el movimiento sinusoidal del punto P.

Veamos, en segundo lugar, que, efectivamente, con esta expresión podemos especificar la propagación del movimiento de unas a otras moléculas con velocidad v; en efecto, la posición del punto P de abscisa x_1 en el instante t_1, queda determinada (pues los valores de a, ω y v están perfectamente determinados por las características especiales del líquido) por la expresión de y:

$$y_1 = a \text{ sen } \omega\left(t_1 - \frac{x_1}{v}\right);$$

ahora bien, si, efectivamente, el movimiento se propaga a la molécula de líquido que en reposo se encuentra localizada, sobre el mismo rayo, por su abscisa x_2, tomará en el tiempo posterior t_2 un estado de movimiento que queda definido por la ordenada de esa molécula en ese preciso instante, la cual está dada por

$$y_2 = a \text{ sen } \omega\left(t_2 - \frac{x_2}{v}\right);$$

pero es evidente que, para que haya propagación, hace falta que esta ordenada de x_2, en el instante t_2, sea idéntica a la que tenía la molécula de abscisa x_1 en el tiempo anterior t_1, y que precisamente $t_2 - t_1$ sea el tiempo empleado por la propagación de la onda para recorrer la distancia $x_2 - x_1$; para que ambas ordenadas resulten iguales, debe ser

$$t_1 - \frac{x_1}{v} = t_2 - \frac{x_2}{v}; \quad \text{de aquí} \quad x_2 - x_1 = v\,(t_2 - t_1),$$

de donde se deduce que el espacio $x_2 - x_1$ ha sido recorrido con una velocidad v durante el tiempo $t_2 - t_1$ (1).

La expresión (γ) puede tomar otros aspectos:

$$y = a \text{ sen } 2\pi\left(\frac{t}{\tau} - \frac{x}{\lambda}\right) = a \text{ sen } \frac{2\pi}{\tau}\left(t - \frac{x}{v}\right) = a \text{ sen } \omega\left(t - \frac{x}{v}\right),$$

si se quiere poner de manifiesto la longitud de onda y el período del movimiento de cada punto material o molécula líquida.

Obsérvese ahora que según la definición que dimos para el período y la longitud de onda, se debe tener en la ecuación

$$y = a \text{ sen } \omega\left(t - \frac{x}{v}\right) = a \text{ sen }\left(\omega t - \frac{x\omega}{v}\right)$$

las dos siguientes relaciones:

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega}; \text{ y, } \lambda = \frac{2\pi}{\omega/v} = \frac{2\pi v}{\omega}$$

(1) Véase también nuestros *Apuntes de Radiotecnia*, pág. 34. Barcelona, 1937 (agotada).

En la figura se representan las distintas radiaciones en escala logarítmica de sus longitudes de onda. La radiación de descarga se produce cuando una chispa eléctrica pasa a través del aire, pero son poco conocidas. La región entre los Rayos Schumann y los rayos X está prácticamente inexplorada.

Las ondas usadas en T. S. H. son Hertzianas largas.

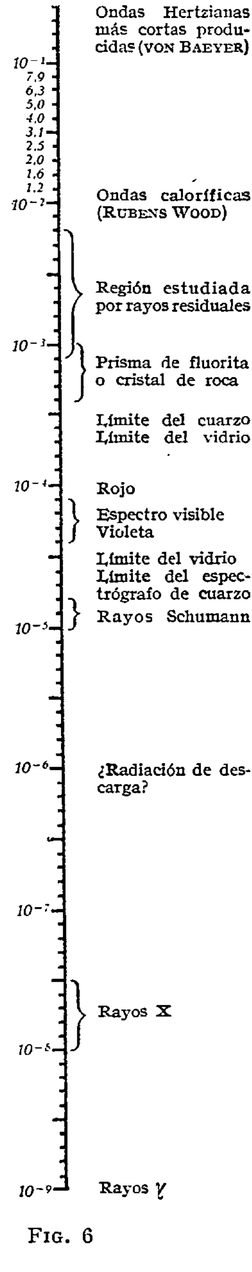


FIG. 6

(en efecto, con respecto al tiempo, para hallar el período, basta dividir el número 2 π por el coeficiente de t, mientras que en el espacio, para hallar la longitud de onda, basta dividir 2 π por el coeficiente de x), de las que se deduce fácilmente

$$\lambda = v\,\tau.$$

Esta relación es fundamental y dice que *la longitud de onda es igual al producto del período por la velocidad de propagación;* o de otra manera menos abstracta, pero más intuitiva: mientras una molécula recorre un ciclo completo de su movimiento, la onda se ha desplazado hasta alcanzar otra molécula, separada de la primera por una distancia igual a la longitud de onda.

Obsérvese que lo que caracteriza la onda o, como se dice también, el *frente de onda,* es que en un instante dado, o sea, para t fijo, la y correspondiente a todas las moléculas que forman el frente de onda debe valer lo mismo, o sea un valor constante y_1 (aun cuando ese valor fijo lo hemos tomado como el de una cresta, puede ser otro valor cualquiera de los posibles en el movimiento de una molécula); resulta, pues, que todos los valores de x que den para cada t fijo un valor fijo a y en la expresión (γ), nos determinan las posiciones de las moléculas que se encuentran situadas en un frente de onda; en la expresión (γ) hace falta que $x =$ constante, y puesto que todas las distancias se cuentan desde el

centro ello explica que las ondas sean círculos cuyos radios son los valores que toma esa constante.

EJERCICIO. En el movimiento de propagación definido por la expresión $y = 1{,}5$ sen $(62{,}8\,t - 0{,}18\,x)$ determinar la pulsación, período, velocidad de propagación, frecuencia y longitud de onda; determinar también los radios de las superficies de ondas que al cabo de 5 segundos dan a la ordenada el valor máximo; es decir, de cresta.

Radiación. Por radiación se entiende la transmisión de la energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. La energía radiante puede ser emitida por un cuerpo por causa de su temperatura, como, por ejemplo, en el caso de un filamento caliente de una lámpara incandescente o por causa de cualquier otra excitación eléctrica, tal como la luz neón en los tubos del mismo nombre.

Todas las formas conocidas de energía radiante tales como rayos cósmicos, rayos gama, rayos X, rayos ultravioleta, *rayos visibles o luz,* rayos infrarrojos, ondas hertzianas y ondas radioeléctricas, son ondas electromagnéticas; la única diferencia entre ellas estriba en su frecuencia o longitud de onda. El espectro electromagnético conocido hasta ahora se extiende desde una longitud de onda menor de 0,00005 milimicrones en la región de los rayos cósmicos, a longitudes de más de 20 000 m que corresponden a ondas de radio de gran longitud (fig. 6).

Flujo radiante. Por flujo radiante se entiende la cantidad de energía radiante transmitida por unidad de tiempo. Se mide generalmente en ergs por segundo o en microvatios.

Naturaleza de la luz

La luz, al igual que las demás ondas electromagnéticas, puede representarse, para la comprensión de los fenómenos a que da lugar, por una oscilación de carácter sinusoidal, caracterizada por su longitud de onda λ, y su velocidad de propagación; puede, pues, ser considerada como algo que se propaga según la expresión (γ) que dimos antes y cuyo conocimiento exacto ni es fácil ni nos va a interesar para las aplicaciones que pensamos hacer en este manual. La velocidad de propagación de la luz en el vacío es $c = 300\,000$ km/s $= 3 \cdot 10^{11}$ cm/s, y esta velocidad cambia, como veremos después, según el medio en que se propaga. La longitud de onda no es siempre la misma; es decir, que hay varias clases de luz que impresionan nuestro órgano de la visión, dándonos la sensación de *color;* cada color corresponde, pues, a una longitud de onda, o a una determinada frecuencia, lo que es equivalente, y cuando la luz es toda de una sola frecuencia o color se dice que es *monocromática.* El conjunto de todas las radiaciones luminosas comprende aproximadamente longitudes de

onda de 400 a 700 mμ [1], lo cual representa menos de una octava del espectro electromagnético. Las radiaciones en las longitudes de onda que se encuentran inmediatamente debajo del extremo violeta del espectro visible (400 mμ), se conocen por rayos ultravioleta, que son invisibles. Las radiaciones que se encuentran inmediatamente por encima del extremo rojo del espectro visible (700 mμ), tienen el nombre de rayos infrarrojos, que también son invisibles.

Primera característica de un foco de luz: Distribución espectral. Todo cuerpo capaz de emitir luz lo hace en determinadas condiciones, de tal modo que si éstas se conservan invariables y su composición química es la misma, el conjunto de longitudes de onda correspondiente a los diversos colores de luz emitida es también invariable, si

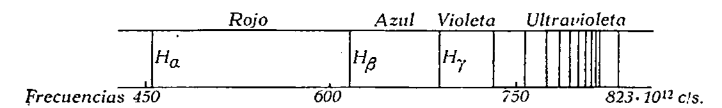


Fig. 6 bis. Líneas del espectro del hidrógeno

bien la cantidad de luz radiada, o sea su intensidad, puede ser muy variable. Este conjunto se llama su *espectro de emisión* para aquella substancia y para los cuerpos que en Química se llaman cuerpos simples: hierro, cinc, níquel, etc.; este espectro está constituído por *rayas*, es decir, longitudes de onda distintas que no forman un intervalo continuo de números, sino que forman series de números discontinuas. El ejemplo más típico lo tenemos en el sodio que da solamente dos rayas de 5890 y 5895,5 Å en la región amarilla. Se supone que estas rayas son emitidas por la excitación de los átomos de los cuerpos simples, mientras que las moléculas emiten espectros formados por rayas más anchas llamadas *bandas*. Cada material emisor tiene preferencia por la emisión de rayas o bandas en una determinada región del espectro, y así mientras el sodio lo hace en la zona amarilla, el mercurio, por ejemplo, tiene preferencia por el verde y violeta y aun el ultravioleta, pero siempre el *mismo* foco da las *mismas* radiaciones, que, por tanto, se pueden considerar como características de él en su conjunto, y esto constituye uno de los más interesantes descubrimientos de la física actual. Pero, como a nosotros en este manual no nos interesa ésta, sino sus aplicaciones al cine, diremos que se eligen aquellos focos que tienen más poder *actínico*, esto es, aquellos que son ricos en radiaciones en el extremo violeta y ultravioleta,

---

[1] Para medir las longitudes de onda se emplea la unidad Angstrom (Å), que vale 0,000,000,01 cm $= 10^{-8}$ cm, y también el milimicrón que vale 10 Å, o sea 0,000,000,1 $= 10^{-7}$ cm. Un micrón o una micra es la milésima de mm y se representa por la letra μ, y un milimicrón por mμ.

porque, como veremos después, las placas fotográficas se impresionan más fácilmente por estas radiaciones y porque la apariencia para el ojo humano es más semejante a la luz natural del día, en cierto grado, claro está, que para los ricos en radiaciones rojas. En definitiva, *cada*

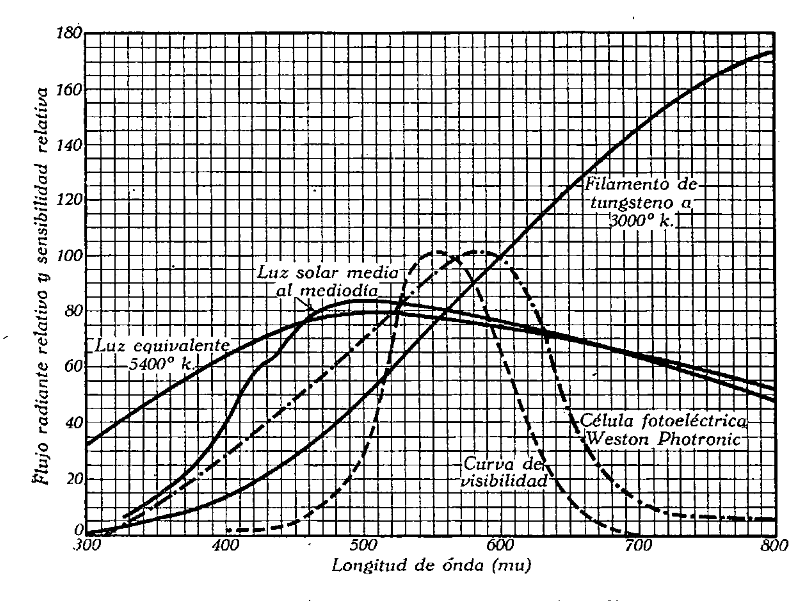


FIG. 7. Distribución espectral de energía radiante de varias fuentes luminosas comparada con la sensibilidad espectral de la célula Weston y la del ojo humano

foco de luz tiene un espectro de emisión característico formado por todas las longitudes de onda de la luz emitida y solamente por éstas (1). La figura 6 bis representa el espectro de emisión del hidrógeno. Algunos cuerpos, no obstante, emiten un espectro continuo de radiaciones y entonces se define la

Temperatura de color. La temperatura de color de una fuente de energía radiante luminosa es la temperatura a la cual un radiador completo (cuerpo negro perfecto) debe calentarse para dar un color igual al de la fuente considerada.

Se mide a partir del cero absoluto —273° en grados de la escala centígrada, y para distinguir la escala absoluta de la escala centígrada usual, se designan por grados Kelvin, tal como, por ejemplo, 3000° K.

---

(1) De esta propiedad se echa mano para aumentar la eficacia de los carbones de arco, colocándoles mechas metalizadas que modifican su espectro, según luego veremos.

La temperatura real de un cuerpo puede no tener relación alguna con su temperatura de color; pues el cielo azul, cuya temperatura es naturalmente muy fría, puede tener una temperatura de color de 25 000° K.

Distribución espectral de la radiación de las fuentes luminosas. La figura 7 muestra la distribución espectral del flujo radiante de varias fuentes de luz a distintas temperaturas de color.

Las curvas están basadas sobre intensidades de visión iguales. Cuando estudiemos el ojo humano ya veremos lo que esto significa.

Nótese que únicamente una pequeña parte de la radiación total es visible, puesto que el resto está comprendido en las regiones de los rayos ultravioleta o infrarrojos.

Segunda característica de un foco de luz: Fotometría. Hemos dicho que la energía radiada, o que se propaga en una onda luminosa representable por la expresión (γ), era proporcional a a^2; pero esta onda, en el caso especial en que nos hemos situado para hacer comprender esa propagación, procede de un foco de ondas, en cierto modo puntual (la piedra), y las conclusiones sacadas serán tanto más exactas cuanto esa piedra sea más pequeña; podemos decir que cada átomo o molécula del foco, cuando por la influencia de circunstancias especiales emite luz, lo hace de modo que no sólo emite un espectro determinado de frecuencias, sino que las amplitudes correspondientes a cada longitud de onda tienen un valor relativo determinado; por ejemplo, podría darse el caso de un foco imaginario que emitiese luz roja de una cierta λ_r y luz azul de *una* determinada λ_a, pero que la amplitud de la onda de luz roja a_r fuese doble que la de la onda azul a_a; entonces, como las energías son proporcionales a sus cuadrados, estas energías, que es en definitiva lo que en el ojo nos da la sensación de intensidad, estarían en la relación de cuatro a uno, y el foco sería cuatro veces más intenso en el rojo que en el azul. Pero, para que un átomo emita luz, hace falta que se den una serie de circunstancias, y así resultará que no todos los puntos o átomos de un cuerpo estarán emitiendo luz, y que cuanto mayor sea el número, más intenso será el foco.

Ahora bien, podemos suponer la superficie de un cuerpo emisor de luz como formada por muchos átomos, y éstos como pequeños elementos de superficie o puntos de la superficie radiante, dando a esta palabra *punto* un sentido distinto del que tiene en matemática. Entonces cada *punto* radia luz en todas direcciones, y llamaremos haz de luz al conjunto de la luz que sale de cada uno de aquellos elementos. De todo este haz de luz, la cantidad recogida por una pantalla depende: del tamaño de la pantalla, de la distancia a que se encuentre la pantalla del foco, y de la inclinación que tenga esa pantalla con relación a la superficie o foco emisor de luz; todas las demás cosas iguales; es evidente que una pantalla de 20 m² recibe doble cantidad de luz, o, empleando una frase más técnica, doble flujo de luz, que otra pantalla, que situada igualmente que la anterior y con las demás condiciones idénticas, tuviese sólo 10 m². Podemos afirmar, pues, que el

flujo o cantidad que recibe una superficie es a igualdad de las demás condiciones, *proporcional* a esa superficie. También resulta que colocada una pantalla de 10 m² de superficie a una distancia del foco de luz de 2 m, y otra igual, a 6 m del mismo foco y en idéntica posición, la primera recibe 9 veces más luz que la segunda; pero ese número 9 es precisamente $\frac{6^2}{2^2} = 9$ y lo mismo sucede siempre; al aumentar la distancia disminuye la cantidad de luz recibida y esta disminución varía en proporción a la unidad dividida por el cuadrado de la distancia; esto es, también *el flujo varía en razón inversa del cuadrado de la distancia.*

Por último, colocada una superficie a una cierta distancia de un foco de luz, si la ponemos normalmente a la dirección que une su centro con el foco (supuesto bastante pequeño), recibe mayor cantidad de luz que si la inclinamos con relación a esa posición sin cambiar la distancia, siendo cada vez menor a medida que aumenta el ángulo de inclinación con la posición inicial, hasta no recibir nada cuando ese ángulo vale 90°. Podría suponerse aquí que la cantidad de luz es inversamente proporcional al ángulo, pero como al pasar, por ejemplo, de 15° a 30° la cantidad de luz que recibe la pantalla bajo 30° no es la mitad de la que recibe con 15° (ésta sería la condición de proporcionalidad), no se puede deducir tal suposición. Pero si no es proporcional al ángulo, sí puede serlo a una magnitud que varíe con el ángulo, disminuyendo a medida que ese ángulo crece, y, efectivamente, esto es lo que sucede con el coseno de aquel ángulo: *el flujo de luz es también proporcional al cos del ángulo que forma la perpendicular a la pantalla con la dirección de la recta que une el foco al centro de la pantalla.*

¿No depende de ningún otro factor, la cantidad o flujo de luz que recibe una pantalla de un foco? Sí; depende de algo que es inherente o propio del foco; de su generosidad para dar ese foco luz, porque no todos los focos son igualmente pródigos para despilfarrar luz; es decir, los elementos puntuales de una vela — pongamos por foco tacaño — dan mucho menos luz que los elementos puntuales de un arco voltaico de los empleados en cine, que es un foco muy derrochador. Podemos darnos una idea de la falta de economía de los focos suponiendo que cada rayo de luz que sale de un elemento puntual de un foco es la trayectoria de una pequeña partícula [*fotón*, llaman los físicos modernos (¹)] lanzada por éste; entonces cada elemento del foco-vela lanzará bastante menos partículas que el correspondiente del foco-arco de cine; es decir, en el segundo caso esas trayectorias son más apretadas,

---

(¹) Quien desee informarse sobre la nueva física atómica y las designaciones actuales lea el notable librito de GEORGE GAMOW *Nacimiento y muerte del sol*, Espasa Calpe. Su autor es uno de los creadores de la física del núcleo, y el libro está desarrollado en un estilo divertido e ingenioso, de divulgación verdaderamente notable. Más completa información puede hallare en la obra de E. ZIMMER *Revolución en el mundo de la Física*, 1944; editor G. Gili. Barcelona.

más *densas*, que para la vela, y diremos correlativamente que el arco tiene más *densidad de luz* o *brillo intrínseco* que la vela.

La misma interdependencia que existe entre la luz recibida por una pantalla, la distancia y el ángulo, cuando, el foco es fijo, se obtiene si, por el contrario, la pantalla es fija y son aquellas magnitudes referidas al foco las que varían; esto es: el flujo de luz es entonces directamente proporcional a la superficie del foco, al coseno de su inclinación, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. En conjunto, ambos casos se abarcan en la *ley de Lambert*, conocida de todos aquellos que se dedican a cuestiones de iluminación, y de las cuales constituye el primer y más importante escalón. Dado que nosotros hemos de procurar la mayor cantidad de luz posible en la pantalla del cine, es cosa lógica que nos interese conocer bien esta ley. Si se llaman s y S las superficies de foco y de la pantalla, θ_1 y θ_2 los ángulos de las perpendiculares o normales a las superficies con la línea que las une, r la distancia entre ambos, y E al brillo intrínseco o densidad del foco, esa ley se formula así (fig. 8):

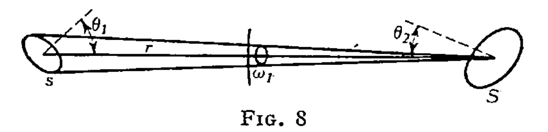


FIG. 8

$$\Phi = \frac{E \cdot s \cdot S \cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2}$$

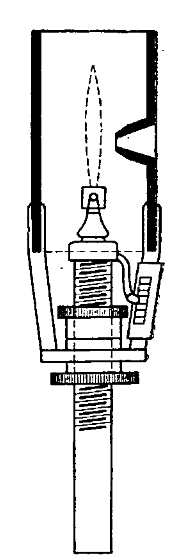
Φ es el flujo de luz recibido por S desde s. Esta expresión se ve que es simétrica con respecto al foco y a la pantalla; es decir, respecto a S y s. Si en ella se pone

$$I = E \cdot s \cdot \cos \theta_1,$$

se convierte la anterior en

$$\Phi = \frac{I \cdot S \cos \theta_2}{r^2} = I \, \Omega_1, \qquad (a)$$

en la que Ω es el ángulo sólido bajo el cual se ve S desde s; la magnitud I se llama *intensidad* o *potencia luminosa del foco* y se mide en *bujías*. La bujía es una unidad convencional *standard* que se mantiene en los laboratorios de Inglaterra, Francia y Estados Unidos en forma de lámparas incandescentes cuidadosamente calibradas y medidas. En Alemania se toma como patrón la bujía Hefner, que vale 0,9 bujías internacionales (como también se designa la anterior). La figura 9 representa una bujía *substandard* de la casa Kodak, empleada como patrón en sus laboratorios.


FIG. 9

De la última expresión se puede deducir el flujo total de luz emitido o radiado por un foco en derredor de él, que vale

$$\Phi = 4\pi\, I,$$

puesto que el ángulo sólido vale $4\,\pi$ esterradianes en este caso.

Unidad de flujo luminoso. Se llama *lumen*, y es el flujo luminoso contenido en el ángulo sólido unidad (esterradian), cuando el foco radiante o emisor es un punto luminoso de potencia de una bujía. Como este ángulo sólido unidad se mide por el área de un centímetro cuadrado de una superficie esférica que tenga de radio un centímetro o por el área de un pie cuadrado de una esfera que tenga un radio de un pie, resulta que una bujía radia $4\,\pi$ lúmenes = 12,57 lúmenes y que el lumen puede definirse indistintamente diciendo que es el flujo que envía una bujía sobre un centímetro cuadrado de una superficie esférica de un centímetro de radio o el que envía sobre un pie cuadrado de una esfera de un pie de radio.

Iluminación de una superficie. Suponiendo homogéneo el flujo de luz que recibe una superficie, es evidente que se podrá conocer la totalidad del recibido por ésta cuando se conozca lo que recibe por unidad de área y el ángulo que forma la dirección de dicho flujo con la normal a la superficie; en el caso más corriente de ser nulo dicho ángulo, tiene interés definir la unidad de medida de lo que se llama *densidad de iluminación*, que no es otra cosa que el flujo recibido por unidad de área de dicha superficie:

$$\sigma = \frac{\Phi}{S}$$

(en el caso de no ser nulo aquel ángulo habría que obtener el flujo mediante la multiplicación por el cos del mencionado ángulo, ya que

$$\Phi = \sigma \cdot S \cdot \cos\,\theta_2$$

En la práctica existen tres unidades de intensidad o, más propiamente, densidad de iluminación: la *bujía-metro* o *lux*, el *foto*, y la *bujía-pie*, según que la unidad de área sea el metro, el centímetro o el pie cuadrado.

La *bujía-metro* o *lux* más corrientemente empleada en Europa es la densidad de iluminación de un metro cuadrado de una superficie, cuando incide normalmente sobre ella un lumen; ahora bien, puesto que una bujía produce sobre la superficie esférica de un metro de radio $4\,\pi$ lúmenes y esta superficie en metros cuadrados vale $4\,\pi$, el flujo por metro cuadrado valdrá un lumen, luego un lux es la densidad que se obtiene en una esfera de un metro de radio, cuando en su centro hay

un foco de una bujía; de aquí el nombre de bujía-metro. Se tendrá, por tanto,

$$\Phi_{lúmenes} = \sigma_{lux} \times S_{m^2} = \sigma_{bujías\text{-}metro} \times S_{m^2};$$

es fácil ver, después de las definiciones que daremos a continuación, que un lux = 0,0001 fotos = 0,0929 bujías-pie.

El foto. Si en lugar de tomar el metro como unidad lineal tomamos el centímetro, se tendrá

$$\Phi_{lúmenes} = \sigma_{fotos} \times S_{cm^2}$$

y podremos definirle diciendo que es la densidad de iluminación que se obtiene en una esfera de 1 cm de radio por centímetro cuadrado, cuando en su centro hay un foco radiante de una bujía; o bien la densidad de una superficie de 1 cm², cuando incide normalmente sobre ella un flujo de un lumen.

Se deduce fácilmente que un foto es igual a 10 000 lux e igual a 929 bujías-pie.

Bujía-pie. Tomemos como unidad lineal el pie y tendremos la relación

$$\Phi_{lúmenes} = \sigma_{bujías\text{-}pie} \times S_{pies^2};$$

podremos, pues, definir la bujía-pie diciendo que es la densidad por pie cuadrado que se obtiene en una esfera de un pie de radio cuando en su centro hay un foco de una bujía de potencia, o la densidad en una superficie de un pie cuadrado cuando incide sobre ella normalmente un flujo de un lumen.

Como quiera que

$$\sigma_{bujías\text{-}pie} = \sigma_{lux} \frac{S_{m^2}}{S_{pies^2}} = \frac{1}{0{,}305^2} = 10{,}76,$$

resulta que una bujía-pie vale 10,76 lux y también 0,001076 fotos.

Reflexión difusa. Hasta ahora nos hemos ocupado de la luz emitida por un foco de luz y recibida por una superficie; pero es evidente que, a su vez, esta superficie reflejará luz en mayor o menor grado, comportándose como la superficie de un foco, y puesto que la expresión anterior es simétrica respecto S y s, podremos imaginar un cierto brillo intrínseco o densidad de luz para ella; se dice entonces que la luz es *reflejada difusamente*, porque no se puede definir como para los cuerpos reflectores un índice de reflexión igual a — 1 (véase *reflexión de la luz*). Ese brillo, tanto si se trata de una superficie luminosa o foco, como si es una reflectora, depende de su carácter, del color y de la iluminación emitida o recibida por la misma. Por ejemplo: una superficie negra y una blanca pueden recibir la misma iluminación, pero la superficie negra que absorbe flujo luminoso no aparece tan

brillante como la blanca que lo refleja; se ve la importancia que estas consideraciones tienen para la elección de pantallas de cine.

El brillo intrínseco de una superficie puede expresarse de dos modos diferentes:

1.° Suponiendo la superficie del foco como si emitiese un flujo de luz homogéneo uniforme en toda su superficie; entonces basta conocer el flujo que emite por unidad de superficie o *densidad* de flujo de energía, y se expresará en lúmenes por unidad de área:

$$\varrho = \frac{\Phi}{s} \qquad \Phi = \varrho\ s;$$

se tienen así las unidades *lambert* y *lambert-pie*, que son el brillo intrínseco de un foco que emite un lumen por centímetro cuadrado y el de uno que emite un lumen por pie cuadrado, respectivamente.

2.° De la expresión que dimos antes y suponiendo que la emisión se realiza normalmente, será:

$$I = E\ s,$$

de donde

$$E = \frac{I}{s}$$

y entonces el brillo puede expresarse en bujías por centímetro cuadrado, o en bujías por pulgada cuadrada [1].

Para reducir brillos expresados de esta forma a lambert o a lambert-pies, obsérvese que se tiene

$$\varrho_{lamberts} = \frac{\Phi_{lúmenes}}{s_{cm^2}} = \frac{I_{bujías} \cdot \pi}{s_{cm^2}} = \pi \cdot E_{bujías/cm^2};$$

luego el brillo en bujías por centímetro cuadrado multiplicado por $\pi = 3{,}1416$ nos da el brillo expresado en lamberts; y para pasar de bujías por centímetro cuadrado a bujías por pie cuadrado, o de lamberts a lamberts-pies, basta tener en cuenta que una pulgada vale 2,54 cm y que un pie vale 30,5 cm; se tendrán así las siguientes equivalencias:

Bujía $\times$ cm^2 = 3,1416 lamberts = 2919 lamberts-pies.
Bujía $\times$ $1''^2$ = 0,487 lamberts = 452 lamberts-pies.
Lambert = lumen $\times$ cm^2 = 0,3183 bujías $\times$ cm^2 = 2,054 bujías $\times$ $\times$ $1''^2$ = 929 lamberts-pies.
Lambert-pie = lumen $\times$ pie^2 = 0,001076 lamberts = 0,000343 bujías $\times$ cm^2 = 0,00221 bujías $\times$ $1''^2$.

---

(1) A la bujía Hefner por centímetro cuadrado la designan los alemanes con el nombre de *Stilb*.

Si llamamos:

B al brillo en bujías por pie cuadrado;

E a la iluminación en *foot-candles* (o bujías-pie), y

R al factor de reflexión o *albedo*, como llaman a este factor los astrónomos, que es la relación entre la totalidad de la luz reflejada y la recibida por esa superficie, se tiene la relación

$$B = \frac{E\,R}{\pi}$$

Si E se expresa en lux, B resulta en bujías por metro cuadrado.

A continuación damos algunos de los albedos más usuales (Houstoun):

Papel blanco de envolver	0,80 a 0,95
Papel de barba corriente	0,70
Papel amarillo de empapelar	0,40
Papel verde esmeralda	0,18
Paño negro	0,012
Terciopelo negro	0,004

Cuando estudiemos la iluminación de la pantalla veremos la utilidad de todas estas definiciones y equivalencias.

He aquí también algunos brillos intrínsecos de focos de luz más corrientes:

Foco de luz	Brillo en bujías por milímetro cuadrado
Lámparas fluorescentes	0,0011 a 0,0147
Lámparas de vapor de sodio	0,07
Filamento de tungsteno devanado:	
60 vatios { Brillo de la ampolla	0,017
60 vatios { Brillo del filamento	7,9
Arco de carbón tipo de llama	8,0
Lámparas de vapor mercurio, alta presión	1,4 a 360
Arco alta intensidad, corriente alterna	360
Arco Suprex alta intensidad, corriente continua	600
Arco alta intensidad, corriente continua tipo condensador	500 a 1200
Sol en el zenit	1650

EJERCICIO. La pantalla de un cine ha de tener una imagen de 6 m de anchura, y recibe un flujo de luz de la ventanilla de proyección de 4200 lúmenes; averiguar cuál es la intensidad media de iluminación.

Necesitamos, en primer lugar, calcular la superficie de la pantalla, porque entonces dividiendo aquel flujo por esa superficie en centímetros cuadrados tendremos la iluminación en lux. Ahora bien, como la ventanilla de proyección tiene unas dimensiones de 20,8 por 17,5 mm (es decir, estas dimensiones están en la relación de 1 : 0,84), podremos establecer que

$$\frac{20{,}8}{17{,}5} = \frac{6}{x}$$

de donde la otra dimensión de la pantalla será $x = \frac{6 \cdot 17,5}{20,8} = 504$ m $= 5,04$ m; la superficie de la pantalla será, pues, $6,00 \times 5,04 = 30,24$ m². Por consiguiente, la iluminación será

$$\frac{4200}{30,24} = 140 \text{ lux.}$$

Índice de refracción. Como ya dijimos antes, la luz camina en el aire con una velocidad aproximada de $3 \cdot 10^5$ km segundo; pero, también se propaga en el vacío, es decir, en un espacio de donde se ha extraído toda clase de materia perceptible con nuestros medios de observación, incluso el aire, sensiblemente a esa velocidad o muy próxima. Esta velocidad ha sido determinada de muchas maneras y no sólo en el vacío y en el aire, sino en otros medios, como agua, vidrio, etc., encontrándose que en cada medio la luz de una cierta longitud de onda λ tiene una velocidad distinta que es característica del medio; quiere esto decir que siempre en ese medio se propaga exactamente con esa misma velocidad. Para caracterizar con respecto a la luz ese medio, se refieren todas las velocidades, en los distintos medios, a la que tienen en el vacío, que de ahora en adelante designaremos por c, tomándola como patrón o referencia; así, por ejemplo, en el agua $v_a = 225\,000$ km segundo, y entonces

$$\frac{v_a}{c} = \frac{1}{1,33}$$

en el *crown* (vidrio especial de que están fabricadas las lentes de los objetivos) $v_c = 200\,000$ km segundo, de modo que aquí:

$$\frac{v_c}{c} = \frac{2}{3} = 0,66 = \frac{1}{1,5}$$

e igual se hace con todos los demás medios. Ahora bien, esos números del denominador, 1 (para el aire, su velocidad es igual a la del vacío), 1,33, 1,50, representan lo que se conoce con el nombre de *índice de refracción* del aire, agua, vidrio, etc.; de tal modo, que cuanto menor sea la velocidad con que se propaga la luz en un medio, mayor será su índice de refracción. Se puede escribir, pues, llamando n al índice relativo al vacío:

$$n = \frac{c}{v_n},$$

de donde

$$c = n\, v_n,$$

en la que v_n es la velocidad en el medio de índice n.

Es evidente que todo lo que decimos sobre el índice se refiere a una determinada luz *monocromática*, que generalmente es la que emite

el sodio en la región amarilla del espectro, tomando una sola de sus dos rayas; pues, cuando la luz es blanca o compuesta de varias longitudes de onda, cada una de éstas se propaga con distinta velocidad, dando lugar al fenómeno de la dispersión de que nos ocuparemos después. En general, a medida que aumenta la densidad de un medio aumenta su índice de refracción, o sea, disminuye la velocidad de propagación de la luz.

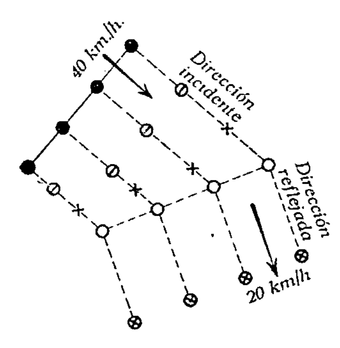


Fig. 10

Refracción de la luz, poder reflector y absorbente. Este cambio de velocidad de la luz, al pasar de un medio a otro, es decir, en la superficie de separación de ambos, debe traducirse en un cambio de la dirección del rayo, de igual modo que sucede con una fila de coches colocados transversalmente en una avenida en el momento de hacer una curva; y, efectivamente, así es; pero, en el caso de la luz la cosa es un poco más compleja. Así, si suponemos que un rayo de luz propagándose en el aire alcanza la superficie libre del agua con una cierta inclinación con respecto a la perpendicular a la superficie del agua en el punto de incidencia del rayo, una parte de la energía sigue propagándose en el aire, aunque lo hace en otra dirección, y otra parte se propaga dentro del agua, también en distinta dirección de la de incidencia. Esta segunda parte se dice que se refracta, y en la nueva dirección que adquiere el rayo (o el frente de onda que es normal a tal rayo) tiene una influencia marcada el índice de refracción que antes hemos definido. Para darse cuenta de que este cambio de dirección en el segundo medio depende exclusivamente de la distinta velocidad con que se propaga en él la luz, basta fijarse en lo que sucede en la fila de automóviles a que antes nos hemos referido, suponiendo que la avenida es recta y que, por consiguiente, para que no pierdan su alineación, todos marchan a la misma velocidad c (fig. 10). Si en un momento determinado reduce su velocidad a $v = c/2$ el primer coche de un extremo de la fila, y cada 3 minutos van reduciendo a v su velocidad cada uno de los sucesivos coches de la fila (se supone que todos están igualmente separados entre sí), que siguen a

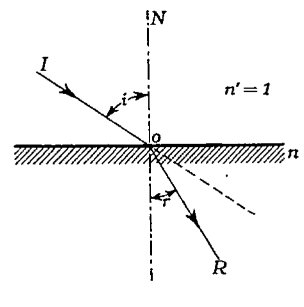


Fig. 11

aquel primero, cuando todos hayan reducido su marcha a esta nueva velocidad v y continúen marchando con ella, formarán nuevamente una fila, pero la dirección de la marcha en bloque será distinta de la de antes, y de no formar la avenida entonces una dirección determinada con la inicial, irán todos a meterse en algún edificio de una de las aceras; esa nueva dirección formará un ángulo con la dirección inicial (o, lo que es lo mismo, con su normal), que depende exclusivamente de la relación entre c y v. Se ve, pues, que cuando los coches caminan en bloque en la forma citada y encuentran una curva obedecen instintivamente, aun cuando la mayoría lo ignoren, a las leyes del notable Descartes, que tal es el nombre del descubridor de esas leyes. Para la luz, concretamente, estas leyes se condensan así:

1. El rayo incidente y el refractado se encuentran en un plano con la normal a la superficie de separación de los dos medios aire y agua.

2. Llamando *ángulo de incidencia* al formado por el rayo incidente y la normal a la superficie del agua en el punto de incidencia, y *ángulo de refracción* al que forma el rayo refractado con esa misma normal; la dirección de este rayo (fig. 11) no está determinada directamente por el valor de ese ángulo, como a primera intención podría ocurrirse, sino por el valor del seno de ese ángulo, en la siguiente forma:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n = \frac{c}{v_n};$$

o bien

$$\text{sen } i = n \cdot \text{sen } r \text{ ,, sen } r = \frac{\text{sen } i}{n};$$

así, por ejemplo, si el ángulo de incidencia vale 30°, y el medio es agua, cuyo índice sabemos vale 1,33, entonces en una tabla de logaritmos determinamos el valor del sen de 30° = 0,5; y ahora dividiendo 0,5/1,33 = 0,37, será el sen del menor ángulo que determinaremos mediante unas tablas, y da para $r = 21°42'$.

EJERCICIO. Un rayo de luz forma en el aire un ángulo de incidencia de 40° y al atravesar la superficie de un vidrio forma un ángulo de refracción $r = 28°$; encontrar el índice de ese vidrio.

Como los ángulos en cuestión son menores que 90°, si consideramos medios más densos que el aire, como los vidrios, será $n > 1$, y, por tanto, sen $i >$ sen r, es decir $i > r$; ello representa que el rayo refractado se desvía aproximándose a la normal; en cambio, si el foco de luz estuviese en el medio más denso, la luz seguiría la misma trayectoria, pero en sentido contrario, y claro es que ahora el rayo refractado se separaría de la normal (para verlo bien, basta invertir la figura 11 invirtiendo también la dirección de las flechas).

¿Qué sucede si el índice vale $n = -1$? En primer lugar, esto significa que el valor de la velocidad de propagación no cambia de valor

absoluto, puesto que de $c/v_n = -1$ resulta $c = -v_n$; por tanto, la luz se propaga en el mismo medio, y sólo hay un cambio en el sentido de la velocidad; veamos, además, los ángulos. Puesto que

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = -1, \text{ sen } i = -\text{sen } r, \text{ de donde } i = r;$$

es decir, *el ángulo de incidencia es igual al de refracción*, que en este caso (fig. 12) se ha convertido en ángulo de *reflexión;* esto se presenta en la reflexión corriente en un espejo.

Estas dos leyes nos conducen, después de la observación inicial, a una distinción entre los medios o cuerpos, en relación con la luz, en dos grupos: *cuerpos reflectores* u *opacos*, en los cuales la mayoría de la energía o luz que incide es reflejada, y sólo una pequeñísima parte penetra en ellos, y cuerpos *transparentes* o *refractivos*, en los cuales la gran mayoría de la luz o energía incidente penetra en su interior, y muy poca es reflejada. Los espejos —nos referimos al baño situado detrás del cristal que lo forma— pertenecen al primer grupo, los vidrios que forman los objetivos se incluyen en el segundo.

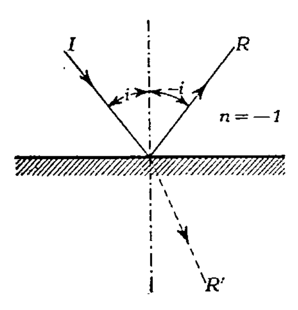


FIG. 12. En muchos cuerpos una parte se refleja según R y otra se refracta según *R'*

Esta distinción que hacemos no es puramente académica como el lector a primera vista pudiera suponer, pues tiene un interés práctico en la construcción de objetivos y sistemas formados por varias lentes. En efecto, casi todos los vidrios empleados para tales fines no solamente reflejan una pequeña parte de la luz que incide sobre ellos, sino que además no son totalmente transparentes y se comportan como medios *absorbentes* (los cuerpos no absorbentes son los que eléctricamente son aislantes o dieléctricos puros) en una cierta medida, es decir, que el rayo que se propaga en su interior, o rayo refractado, va perdiendo en amplitud a medida que profundiza en dicho medio según una forma que se llama exponencial. De modo que cuando contemos, a la entrada de una cierta lente, y aun cuando la incidencia sea normal, que es el caso más favorable o de menores pérdidas (en tal caso el ángulo i de incidencia vale cero), con un flujo de luz de, por ejemplo, 20 lúmenes, una fracción de este flujo se perderá por reflexión en la cara de entrada de la lente desde el aire al vidrio, y otra parte de ese flujo restante que penetra se irá perdiendo a medida que la luz avanza en el vidrio, y tanto más para una clase de vidrio determinada cuanto más gruesa sea la lente; si la lente tiene 1 cm de grueso, ambos términos contribuyen, por ejemplo, con el 10 %, de modo que a la salida sólo se recogerán, en el caso concreto que damos, 18 = 20 — 2 lúmenes de los 20 incidentes.

Para que se tenga una idea de tales factores, diremos que el factor de reflexión, que se llama *poder reflector*, vale

$$\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$$

para la incidencia normal, donde n es el índice del vidrio; este factor viene a ser del orden del 4 %. El otro factor, que se llama por ello *poder absorbente*, viene dado también, para incidencia normal, por

$$e^{-\frac{4\pi k d}{\lambda}}$$

en la que $e = 2{,}71$, λ la longitud de onda de la luz, d el espesor atravesado por la luz y k una cantidad que depende de la naturaleza del vidrio. Sin embargo, como decimos antes, se pueden englobar ambos factores en uno solo, de valor cuando las lentes no exceden de 1 cm de espesor, igual al 10 %, llamándose a tal factor *coeficiente de transparencia.*

Esto explica claramente los esfuerzos que hacen todos los constructores de objetivos en disminuir en lo posible el número de lentes componentes, y porque, siempre que es posible, tratan de poner lentes pegadas en lugar de separadas, mediante una substancia de índice muy parecido al de ambas lentes; pues de este modo las pérdidas por reflexión se reducen al disminuir las superficies de paso aire-vidrio de la luz.

EJERCICIO. El flujo que alcanza un objetivo a incidencia normal de tres lentes separadas delgadas (de espesor no superior a 1 cm) es de 4200 lúmenes; determinar el flujo que sale del objetivo.

De la primera lente saldrán 4200 — 420 = 3780 lúmenes.

De la segunda lente saldrán 3780 — 378 = 3402 lúmenes.

De la tercera, y por tanto, del objetivo, saldrán 3402 — 340,2 = 3061,8 lúmenes.

Una observación importante queremos hacer notar aquí: A veces aparecen en las lentes de algunos objetivos pequeñas burbujas de aire en el interior del vidrio, lo que induce al comprador a rechazar como defectuoso el objetivo que posee dicha lente; tal proceder sin más análisis es injustificado. Todos los cristales empleados en óptica de objetivos suelen tener sales metálicas diluídas y, por lo general, pesadas, de tal modo que si en el momento de solidificarse la masa fundida de que están hechas dejase de removerse dicha masa (para eliminar las burbujas de aire que por su menor peso subirían a la superficie), aquellas sales se irían al fondo de la vasija y el vidrio no tendría, al solidificarse, la homogeneidad, en cuanto a su composición, adecuada a los fines ópticos y que les dan aquellas sales. Después de lo que hemos dicho respecto a pérdidas y teniendo en cuenta la pequeñez de las burbujas, éstas representan una pérdida de luz de 0,05 %, lo cual es insignificante y no perjudica la calidad de la lente.

Ángulo límite. Como hemos indicado antes, cuando la luz camina, por ejemplo, del agua al aire, el rayo refractado se separa de la normal. Imaginemos (fig. 13) que el rayo incidente va aumentando su inclinación con respecto a la normal, aumentando, por consiguiente, su ángulo de incidencia i; tal como se indica en la figura 13, por las posiciones (1), (2), (3), la ley de la refracción nos dará ahora un crecimiento progresivo del ángulo de refracción (1′), (2′), (3′); y puede darse el caso de que la inclinación del rayo incidente sea tal i_1, que el rayo refractado salga *rasante*, es decir, que valga 90° y, por tanto, se confunda con la misma superficie de separación; el valor del ángulo de incidencia i se llama entonces ángulo límite para esos dos medios aire-agua. ¿De dónde le viene esa denominación? Para saberlo basta considerar lo que sucederá a un rayo de luz que, partiendo del foco, caiga sobre la superficie bajo un ángulo mayor que aquel ángulo límite, tal como el rayo (r) — (r'); este rayo ya no atraviesa esa superficie de separación, sino que experimenta una verdadera reflexión en la superficie de separación, y por tanto, ninguna luz que incida en la superficie bajo un ángulo mayor que el límite puede salir al aire desde el agua. La reflexión se efectúa como si se tratase de un verdadero espejo; esto es, que en el punto de incidencia P, el ángulo de incidencia es igual al de reflexión.

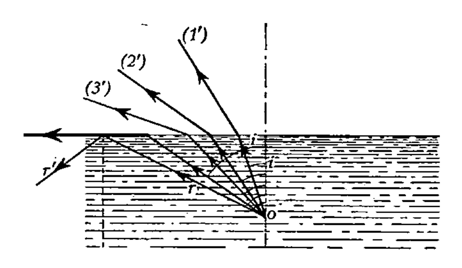


Fig. 13. Reflexión total

Una aplicación interesante de esta propiedad se hace en algunos aparatos de cine, en especial para observar, por ejemplo, si la imagen luminosa de la excitadora sobre la banda de sonido de la película se encuentra correctamente enfocada, utilizando para ello un prisma de *reflexión total* (fig. 14), que no es otra cosa que un prisma de vidrio con uno de sus ángulos recto y las dos caras que forman este ángulo iguales. Suponiendo que el rayo de luz incide normalmente sobre una cara del ángulo recto, este rayo no experimenta desviación y penetra en el vidrio hasta encontrar a la cara oblicua, sobre la que incide bajo un ángulo mayor que el límite; en consecuencia, experimenta una reflexión, y en su nueva dirección cae normalmente sobre la otra cara del ángulo recto del prisma, por lo que saldrá al aire sin experimentar ninguna desviación.

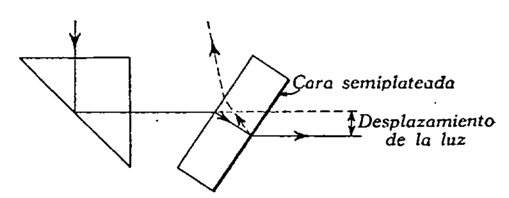


Fig. 14. Efecto sobre la luz de un prisma de reflexión total y de una lámina planoparalela. Si ésta está semiplateada, el rayo de puntos marca la dirección del haz reflejado

Esto nos permite observar un objeto que no esté en la dirección de la visión, sino a 90° de esa dirección.

Otro elemento óptico que se emplea para controlar la proyección sobre la pantalla desde la cabina sin necesidad de mirar a dicha pantalla lo constituye la *lámina plano-paralela* (fig. 14). Esta lámina tiene la propiedad, como se deduce fácilmente de la figura, de que los rayos de luz que la atraviesan no sufren desviación en su dirección, sino solamente un ligero desplazamiento que depende del grueso de la lámina; por otra parte, según hemos indicado a su tiempo, no toda la luz penetra en la lámina y una parte de esa luz incidente se refleja al entrar en el vidrio (mediante un plateado semitransparente, se puede aumentar esa cantidad de luz reflejada) en una dirección determinada, de modo que esta segunda parte reflejada puede ser recogida en la cabina en una pantalla, o en la misma pared y observar así si la proyección sobre la pantalla es correcta.

Dispersión de la luz. La luz del Sol o luz blanca —como la suelen llamar los técnicos de óptica— está formada por todas las radiaciones visibles, es decir, por radiaciones de todas las longitudes de onda comprendidas entre el rojo y el violeta; en mayor o menor medida les sucede lo mismo a muchos focos de luz, como, por ejemplo, el arco de carbones empleado en los cines para proyectar la película. Pero resulta que estas radiaciones de distinta longitud de onda caminan en los medios refringentes que se emplean en óptica para formar las lentes de los objetivos, con distinta velocidad v (quiere esto decir que la luz roja o de mayor longitud de onda camina en el vidrio, por ejemplo, con muy distinta velocidad que lo hace la luz violeta o de menor longitud de onda en ese mismo vidrio); el índice de refracción, que como se recordará está ligado a esa velocidad por la relación $c = n \cdot v$, será también distinto para cada color de luz, y la consecuencia de estas distintas velocidades será que si todos los rayos de los distintos colores caen en la superficie del vidrio bajo el mismo ángulo de incidencia, al ser distinto el índice para cada color, también será distinto el valor del ángulo de refracción y, por consiguiente, los rayos de los distintos colores se separarán entre sí. Para darnos cuenta del fenómeno, vamos a proseguir con el símil de los coches que dimos al tratar de la refracción.

Para ello vamos a imaginar (fig. 15) que en la fila de coches de que hablábamos allí, los hay pintados de colores rojo y violeta y que se encuentran en la fila colocados alternativamente con relación a sus colores; además, vamos a suponer que los rojos reducen su velocidad a su mitad y los violetas a su cuarta parte, es decir, que si inicialmente y para mantener la alineación todos marchaban a 40 km hora, los rojos la reducen a 20 km hora y los pintados de violeta lo hacen a 10 km hora. Igual que allí, estas reducciones no se hacen simultáneamente, sino que empieza el primer coche de la esquina a reducir su velocidad al valor que corresponde a su color en un momento deter-

minado, a los 5 segundos de ese momento lo hace el siguiente en la fila según su color, a los otros 5 segundos reduce su velocidad el tercer coche de la fila al mismo valor que el primero y así sucesivamente hasta el último, hasta que todos hayan hecho la reducción de velocidad y después todos siguen sin alterar para nada esta velocidad reducida que cada uno ha tomado. ¿Formarán, como en el caso que describimos allí, nuevamente una *sola* alineación? No, desde luego; el

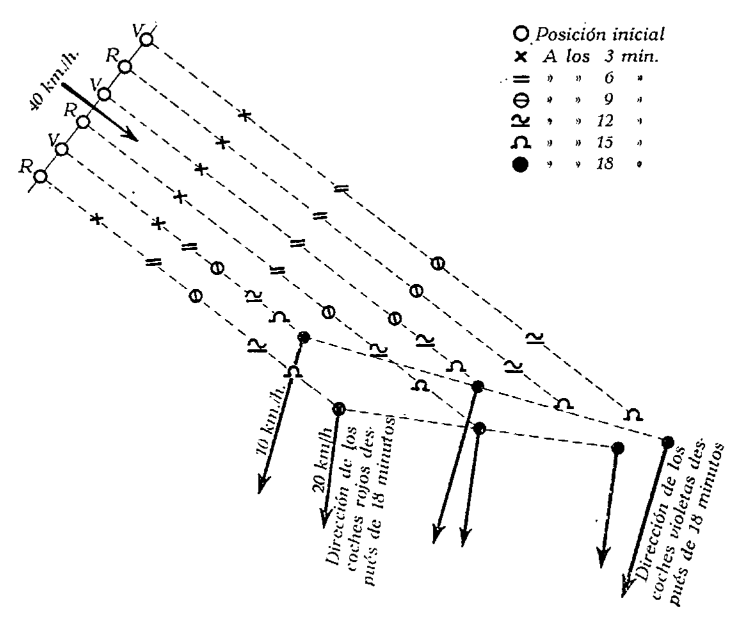


Fig. 15

resultado es ahora dos filas de automóviles que marchan derechamente en direcciones distintas entre sí, y de la dirección inicial cuando todos caminaban con la misma velocidad: en una fila aparecen solamente los coches rojos y en la otra los violetas; es como si la carretera tuviese una bifurcación y por un ramal hubiesen de seguir los rojos y por el otro los violetas; las maniobras que tendrían que hacer los coches supuestos alineados como lo estaban cuando caminaban juntos, serían las descritas. Pero además se observa que los coches rojos se han desviado mucho menos de la dirección inicial que los coches violetas (naturalmente, hay que suponer, como en el caso de la refracción, que en el momento de reducir cada uno su velocidad se les permite efectuar un pequeño giro para conservar la nueva alineación de los de su color).

Dado que las reducciones de velocidad de las distintas radiaciones son comparativamente pequeñas con relación a la velocidad en el

aire, no es fácil la observación en la misma forma que lo hemos hecho para los coches, y para hacerlo patente se emplea el conocido prisma óptico haciendo pasar luz solar o de un arco a través de un agujero practicado en una pantalla interpuesto entre el foco de luz y el prisma; se obtienen 7 imágenes coloreadas del agujero, correspondientes a los 7 colores del arco iris; éste mismo es causado por igual fenómeno en las gotas de agua. Como el índice de refracción de un vidrio varía, según acabamos de ver, con la longitud de onda, o sea con el color, resultará que no tiene sentido decir que el índice del vidrio vale 1,6, por ejemplo, si no se precisa con respecto a qué longitud de onda se refiere ese índice. Casi siempre se suele tomar, para comparar los índices de unos vidrios con otros, la longitud de onda de la raya amarilla del sodio (que corresponde al color de la luz que toma la llama de un quemador de gas ordinario cuando en esa llama se quema la sal común de mesa), la cual vale, como ya dijimos, 5890 UA, y, por consiguiente, si tomásemos otra luz, el valor del índice también cambiaría.

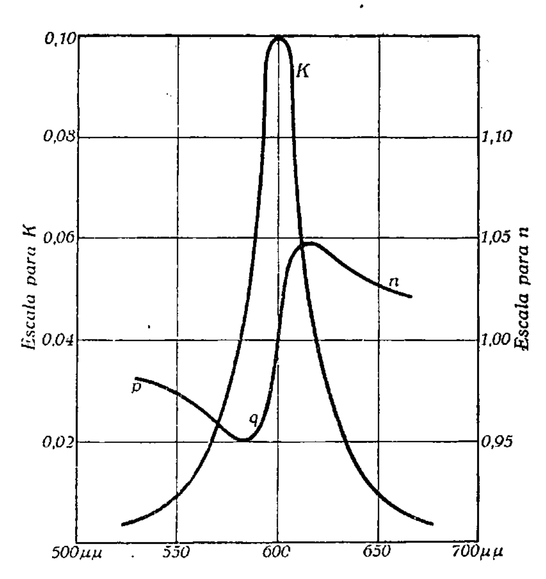


Fig. 16. Variación del índice con la longitud de onda de la luz en las proximidades de una zona de absorción selectiva

Esta variación del índice de refracción n con la longitud de onda de la luz incidente tiene mucho interés en el estudio de los vidrios que componen las distintas lentes de los objetivos de proyección, ya que, según hemos indicado al hablar de la refracción de la luz, en cada vidrio la luz, al atravesarlo, experimenta una *absorción*; esta absorción, que no es igual tampoco para todas las longitudes de onda o colores, está íntimamente ligada a la variación del índice de refracción, mediante una representación semejante a la de la figura 16. En ella se ve que hay una cierta longitud de onda, 600 $\mu\mu$, para la que la absorción toma un valor máximo, es decir, que dicha absorción es *selectiva*, y que en las proximidades de esa λ, el índice de refracción experimenta un cambio muy grande de valor; hay, como suele decirse, una *dispersión anómala* (la frase es poco feliz, porque, en realidad, este tipo de dispersión es normal en la región ultravioleta), en el sentido de que el índice, al contrario de lo que sucede en los vidrios, disminuye al

mismo tiempo que la longitud de onda. Para explicar la dispersión de los vidrios usuales en el espectro visible hay que suponer que la banda o zona de absorción corresponde a una λ situada en la región ultravioleta, y entonces la región visible corresponde a la zona marcada *pq* en la figura 16, en que el índice crece cuando decrece la longitud de onda, o sea al pasar del rojo al violeta. Convendrá, pues, elegir vidrios que en la zona visible del espectro donde han de trabajar no tengan ninguna zona de absorción, para que reproduzcan la luz del foco en la mayor medida posible y que las bandas de absorción estén en el ultravioleta, porque ello facilita la corrección de la aberración cromática de que luego hablaremos.

II. Lentes, sus características y sus defectos. Difracción y estudio de la visión

Generalidades. El hecho de desviarse los rayos de luz al pasar de un medio a otro de distinto índice ha sido aprovechado para la construcción de las conocidas lentes, que nos permiten, bien directamente, bien asociándolas entre sí para la corrección de sus defectos o *aberraciones* (como se las designa en los tratados de Óptica), obtener imágenes de objetos, las cuales pueden ser recogidas o proyectadas, como se hace en cine, sobre una pantalla y que difieran, en cuanto al objeto que las originó, solamente por su tamaño; estas lentes están formadas de vidrios de muy distintos índices, los cuales se logran disolviendo sales metálicas en la masa fundida y procurando que la mezcla sea homogénea.

Existen fundamentalmente dos tipos de vidrios: los llamados *crown-glass* o vidrios ligeros, cuyo índice de refracción es del orden de 1,5, y los vidrios densos o *flint-glass*, cuyo índice es superior a aquel valor; actualmente los progresos en la construcción de objetivos se deben casi exclusivamente a la obtención de vidrios con índice que llegan a valer hasta 2,0 (vidrios silicatados, al boro, fluorita, etc.).

No es posible, ni tampoco tendría ello un interés práctico, desarrollar aquí la teoría elemental o de Gauss de las lentes; pero sí tiene valor dar las expresiones y nomenclatura usual en ellas, porque muchas las habremos de necesitar al tratar de los objetivos, pues sin conocer la nomenclatura de sus elementos fundamentales es imposible comprender la naturaleza de aquellas aberraciones, y saber cuándo un objetivo posee una de dichas aberraciones. Tiene, verdaderamente, un interés práctico, no sólo para el operador o técnico de cine, sino también para el mismo empresario.

Lentes convergentes. Están limitadas por dos caras abombadas o por una plana y otra abombada, pero de tal modo que resultan más gruesas por el centro que por el borde. El único eje de revolución que en el caso más general poseen estas lentes (supuestas esféricas, lo que es el caso corriente) se llama su eje principal, y en ese eje, que no tiene

existencia más que en nuestra mente, se conciben dos puntos llamados *focos principales*, cuya distancia a la cara correspondiente de la lente, conocida con el nombre de *distancia focal*, tiene siempre interés determinar, porque es un dato que se utiliza para conocer la magnitud y posición de la imagen de un objeto colocado ante la lente.

Estos focos representan los puntos donde se reúnen todos los rayos que, marchando paralelos al eje principal, atraviesan la lente; y, aun cuando la lente no tenga las dos caras con el mismo radio de curvatura, las correspondientes distancias focales a los dos sentidos, según las cuales la luz puede penetrar en la lente paralelamente al eje principal, son iguales entre sí e inversamente proporcionales al índice del vidrio menos la unidad; es decir, que si n es el índice y f la distancia focal, y k un número constante para cada lente, se tiene

$$k/f - n - 1.$$

El número de veces que la distancia focal expresada en metros está contenida en 1 m, se llama convergencia de la lente, y ese número es el de *dioptrías* de la lente; así, una lente que tenga de distancia focal 25 cm, tendrá una convergencia de $1/0{,}25 = 4$ dioptrías.

Para las lentes delgadas, *que son las únicas a que nos referimos* y para las que las expresiones que daremos son válidas, tiene interés dos cosas; primero, saber determinar en qué posición con respecto a la lente se encuentra la imagen, cuando se conoce, con relación a la misma lente, la posición del objeto; y, segundo, determinar lo que se llama *aumento lateral*, es decir, cuál es la dimensión del objeto en el sentido normal al eje principal cuando se conoce esa misma dimensión del objeto.

La primera parte la resuelve la fórmula siguiente:

$$\frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$$

en la que f es, como antes, la distancia focal, y p y p' designan las distancias desde la lente al objeto y a la imagen respectivamente, contadas según el eje principal; se considerarán positivas, es decir con signo más delante, cuando vayan de la lente hacia la derecha, y negativas, o sea con signo menos delante, cuando se cuenten desde la lente a la izquierda; se miden a partir de la lente como origen.

La expresión que resuelve la cuestión de magnitud de la imagen es

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{f+p} = \frac{p'+f'}{+f'}, \quad \text{de donde} \quad y' = y\,\frac{p'-f}{-f} = y\,\frac{f-p'}{f}$$

donde y' es la dimensión de la imagen e y la dimensión del objeto; las otras letras tienen la significación de antes: $f = -f'$. Estas fórmulas son muy interesantes porque, como se puede demostrar, son válidas para un objetivo a condición de colocar en ellas las magnitudes equivalen-

tes, y, por ello, se utilizan para determinar el tamaño de la imagen sobre la pantalla en los proyectores de cine, cuando se conoce la distancia focal del objetivo y la distancia de éste a la pantalla; o bien, lo que es más corriente, conociendo la distancia del objetivo a la pantalla y las dimensiones que se desea tenga la imagen en la pantalla, qué distancia focal debe tener el objetivo para conseguir dicha imagen.

El ábaco de la figura 16 bis permite determinar la distancia focal, cuando se conocen las distancias de objeto e imagen.

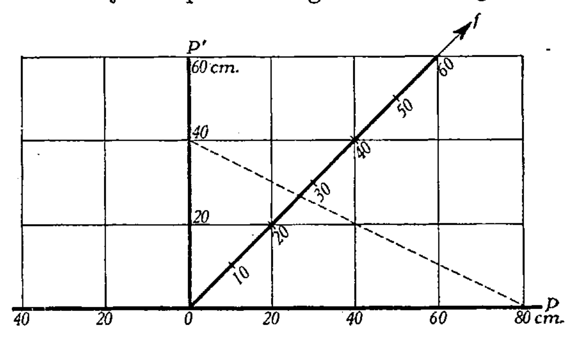


FIG. 16 bis. El objeto está a 80 cm. de la lente y su imagen a 40 cm. y unidos estos dos puntos corta a la línea gruesa en un punto 26,6 cm. distancia focal; como P y P' son positivos ambos, objeto e imagen están al mismo lado de la lente

Observación. Cuando se ha hablado del foco de las lentes hemos dicho que era real porque se podía recoger sobre una pantalla; igualmente sucede con algunas de las imágenes de un objeto dado, y de ello es una muestra patente la imagen de la pantalla del cine; sin embargo, no siempre sucede esto: a veces, en lugar de cortarse los rayos procedentes de un punto del objeto en el correspondiente punto imagen, se cortan sus prolongaciones (pues ellos son divergentes); pero ahora esta imagen formada por prolongaciones de rayos ya no puede recogerse en una pantalla, aun cuando sea visible por una facultad especial del ojo humano, y entonces se dice imagen *virtual.*

Aun cuando pueda derivarse todo de esas dos fórmulas, resumiremos así las propiedades de las imágenes en estas lentes: *Si el objeto está a una distancia mayor que la focal, la imagen es real; ampliada e invertida si está entre el foco y el doble de la distancia focal; reducida e invertida si está a más distancia de 2f de la lente; por último, si se encuentra entre el foco y la lente, la imagen es derecha, ampliada y virtual.*

Para las lentes *divergentes,* que son, por el contrario, más gruesas por el borde que por el centro, son válidas las mismas fórmulas, pero su poco uso en cine justifica el que sólo digamos de ellas que sus imágenes son siempre virtuales, derechas y de menor tamaño.

Tampoco podemos entrar en la determinación de los llamados elementos principales y focos de un conjunto de lentes alineadas o sistema centrado y situadas en posiciones determinadas entre sí; lo que constituye, en fin de cuentas, un objetivo, ya que aquí sólo se trata de dar algunas ideas que tengan valor práctico, pero sí podemos decir que con convenciones adecuadas aquellas fórmulas son también válidas.

EJERCICIO I. Una lente tiene un índice de vidrio de 1,5 y una distancia focal de 14 cm, ¿cuál sería la distancia focal de esta misma lente si su índice fuera 1,9?

$$\frac{1,5}{1,9} = \frac{x}{14};\ x = \frac{1,5 \times 14}{1,9} = 11 \text{ cm.}$$

EJERCICIO II. Una lente convergente de 8 cm de distancia focal tiene un objeto de 0,906 cm, y la imagen está situada a 12 m de la lente, ¿cuál es el tamaño de la imagen?

De la fórmula $y' = y\,\frac{f - p'}{f}$ se obtiene

$$y' = 0,906\,\frac{8 - 1200}{8} = -0,906 \times 149 = -35 \text{ cm}$$

(el signo — nos indica que la imagen es invertida).

EJERCICIO III. ¿Cuál es la distancia focal de una lente que tiene un objeto situado a —12 cm y su tamaño es de 20 mm, mientras que su imagen mide —10 mm?

De la fórmula $\frac{y'}{y} = \frac{f}{f + p}$ sale $f = \frac{p\,y'}{y - y'}$ y en este caso:

$$f = \frac{-120 \cdot -10}{20 + 10} = \frac{1200}{30} = 40 \text{ mm.}$$

Puesto que $y = -12$ cm, el objeto está a la derecha de la lente; de $y' = -10$ mm, la imagen es invertida.

Se ve fácilmente que cuanto más pequeña es la distancia focal para una distancia dada de la imagen, tanto mayor será esta imagen y recíprocamente; lo que puede inducir a creer que conviene tomar lentes (u objetivos para los que son válidas esas fórmulas) de muy corta distancia focal a fin de obtener imágenes grandes en la pantalla de los cines; ello lleva consigo una falta de definición, como luego veremos, y de perspectiva para los espectadores próximos a la pantalla, por lo que aquella elección no es aconsejable.

Espejos esféricos. Por el uso que tienen en los arcos de proyección como reflectores del foco de luz, vale la pena de dar unas someras indicaciones sobre los mismos.

Igual que para las lentes, se llama aquí foco principal el punto donde se reúnen los rayos después de reflejados, cuando éstos inciden sobre su superficie paralelamente a su eje de revolución. Este foco principal se encuentra situado sobre aquel eje de revolución, entre el espejo y el centro de curvatura (el centro de la esfera a que pertenece el casquete que forma el espejo) y a una distancia $\frac{R}{2}$, si es R el radio de aquella esfera, siendo además *real*.

Existen, como en las lentes, dos expresiones que interesa conocer: una, que nos da las posiciones relativas de objeto e imagen referidas al centro de figura del espejo; si llamamos, como allí, p y p' las distancias del objeto e imagen, contadas positivas de izquierda a derecha

a partir del espejo, y f a la distancia focal, se tiene

$$\frac{1}{P} + \frac{1}{P'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R}, \text{ puesto que } f = \frac{R}{2}$$

La otra relación liga los tamaños de objeto e imagen con sus respectivas distancias; llamando, como allí, y e y' a las dimensiones de los objetos, el aumento lateral valdrá

$$\frac{y'}{y} = -\frac{p'}{p} = \frac{f - p'}{f};$$

esta segunda relación permite llegar a las siguientes conclusiones: un objeto a mayor distancia del espejo que R, da una imagen real invertida y de menor tamaño; al doble de f, la imagen es invertida e igual

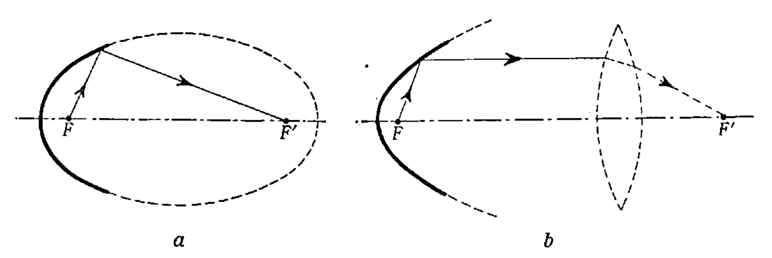


FIG. 17. *a.* Espejo elíptico. Un rayo que parte de F viene a pasar por F'. *b.* Espejo parabólico; todo rayo que parte del foco, sale paralelo y recogido por una lente se sitúa en el foco de ésta

como en las lentes convergentes; para el objeto entre el foco y el centro del casquete, la imagen es real invertida y mayor; y, por último, de un objeto entre el espejo y el foco, éste da una imagen virtual, derecha y ampliada. Aquí, como antes en las lentes, los objetos situados en el foco dan haces de rayos paralelos al eje principal.

De lo anterior se deduce que en caso de los reflectores de arco, el cráter debe estar muy cerca del foco, entre éste y el centro del casquete, a fin de que la imagen amplificada sea suficientemente grande para cubrir el área de la ventanilla por donde desfila la película, ya que el cráter es mucho más pequeño.

EJERCICIO I. Los espejos Ashcraft de arco dan, del cráter del arco, situado a 13 cm del espejo, una imagen en la apertura o ventanilla de la película a 84 cm de dicho espejo. ¿Cuál es la distancia focal del espejo?

$$\frac{1}{13} + \frac{1}{84} = \frac{1}{f}; \quad \frac{84 + 13}{13{,}84} = \frac{1}{f}; \quad f = \frac{13{,}84}{97} = 11{,}25 \text{ cm}; \; R = 22{,}5 \text{ cm}.$$

EJERCICIO II. En el espejo anterior, ¿qué dimensiones mínimas debe tener el cráter en la posición anterior para cubrir totalmente la apertura de la película, que tiene un ancho de 21,3 mm?

$$\frac{21{,}3}{y} = -\frac{840}{130}; \quad y = -\frac{21'3 \times 13}{84} = 3{,}29 \text{ mm}.$$

Cuando lo que decide en la elección de un espejo no es precisamente el precio sino la calidad de la proyección, se adoptan espejos *elípticos* o *parabólicos*, es decir casquetes de estas secciones que contienen al eje mayor y eje de simetria (fig 17). Los primeros, porque en virtud de una conocida propiedad de la elipse, todos los rayos que parten de uno de sus focos, F, donde se ha colocado el cráter de los carbones, van a parar por el otro foco F', donde debe encontrarse la apertura de proyección; los segundos, porque todos los rayos que parten de su foco, donde también se coloca el cráter, salen después de reflejados paralelos a su eje principal; éstos tienen la ventaja de que no exigen una posición determinada (en cuanto a distancia) con respecto a la apertura de proyección, pero precisan el empleo de una lente convergente; tanto unos como otros se emplean poco en España por ser relativamente caros. En los dos casos se aumenta notablemente el flujo de luz que cae sobre la apertura en mayor proporción que en los espejos esféricos, ya que carecen de la aberración inherente a estos últimos.

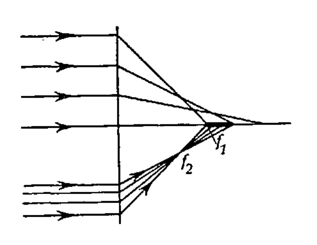


FIG. 18. Aberración de estigmatismo

Aberraciones geométricas. Las fórmulas y consecuencias que hemos dado anteriormente tanto para espejos como para lentes, suponen que ambos tienen pequeña abertura, es decir, que los rayos reflejados o refractados que parten de un punto del eje principal están muy poco inclinados con relación a dicho eje; es la condición para que todos los rayos que salen de un punto del objeto vuelvan a encontrarse en el correspondiente punto de su imagen, pero, cuando la abertura es grande, como sucede en los espejos de proyección y en las lentes individuales que componen los objetivos, aquellos rayos ya no se encuentran en un solo punto de la imagen, o, por mejor decir, ya no existe propiamente una imagen de ese punto, sino que se cruzan todos sobre una superficie, llamada *cáustica* (1).

Ello tiene como consecuencia una serie de defectos de la imagen, inherentes a la distribución geométrica de los rayos, que atraviesan una superficie óptica, los cuales vamos a resumir a continuación.

Astigmatismo. La figura 18 nos da una idea de la marcha de los rayos de luz después de refractados en una lente convergente de gran abertura y que no tenga corregido este defecto; el haz de rayos paralelos al eje principal origina también aquí una cáustica, estando tanto más cerca de la superficie los rayos refractados cuanto más margina-

---

(1) El lector interesado en un estudio preliminar de las aberraciones que se presentan en un sistema óptico (objetivo, ya sea de proyección o de sonido), puede consultar nuestro trabajo: *Ideas sobre la óptica del sonido y la proyección en cine sonoro*, publicado en «Metalurgia y Electricidad», 1945.

les sean. El efecto equivale a que cada corona circular de la lente produce un cono tanto más abierto y una distancia focal tanto más corta cuanto más marginales son los rayos. Si tomamos un pincel marginal, es decir todos los rayos de luz comprendidos dentro de un muy pequeño cilindro paralelo al eje de la lente y tomado este cono cerca del borde de la lente, él mismo, en lugar de dar un punto imagen da dos pequeñas líneas f_1 y f_2 perpendicularmente entre sí (esto es, que la acumulación de luz se realiza según esas líneas), una contenida en el eje principal y la otra perpendicular al plano del papel; estas líneas se llaman *focal sagital* f_1 y *focal tangencial* f^2. La distancia entre ambas se llama *astigmatismo* del pincel de luz, y este defecto se traduce en que, en determinadas direcciones, las imágenes que podríamos recibir sobre una pantalla u observar a ojo desnudo aparecen borrosas; así, por ejemplo, si situamos un círculo centrado en el eje y normal al plano del dibujo y le tomamos por objeto, la imagen recibida en un plano principal (perpendicular al eje principal) que pase por la focal sagital, presentará un aspecto como el de la figura 19 *a*, en el que los radios se ven muy claros, pero la circunferencia borrosa; por el contrario, si la pantalla que recibe la imagen se coloca en el plano de la focal tangencial el aspecto será recíproco, tal como se observa en la misma figura 19 *b*. La imagen será tanto más igual en todos sus aspectos al objeto, cuanto más cerca estén entre sí ambas focales, y cuando se logra esto se dice que la lente está corregida de astigmatismo o que es *estigmática*. Este defecto es relativamente frecuente,

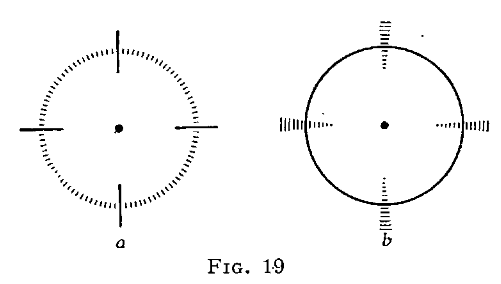


FIG. 19

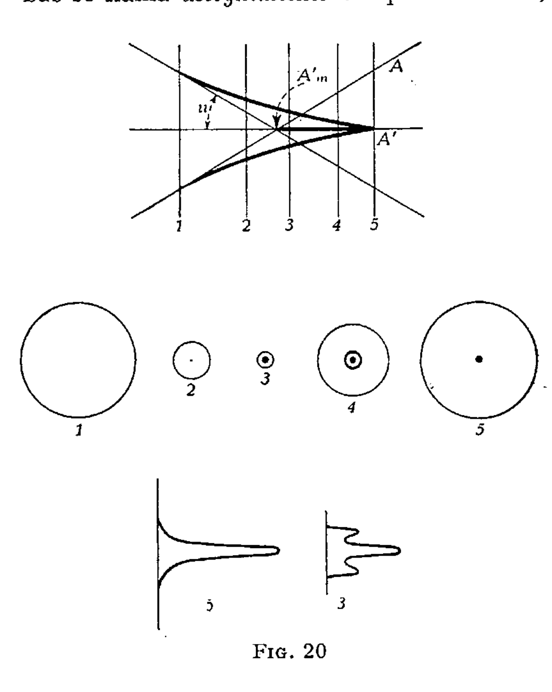


FIG. 20

aunque lo ignoran muchas veces los pacientes por ser poco acentuado, en el sistema óptico que forma el ojo humano, y se comprueba mirando una serie de radios equidistantes de una circunferencia que estén trazados con cuidado e igualmente intensos; la persona que posee tal defecto los ve borrosos o en contacto en la parte central, en una dirección determinada.

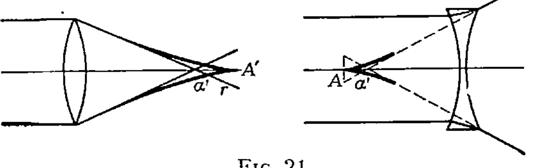
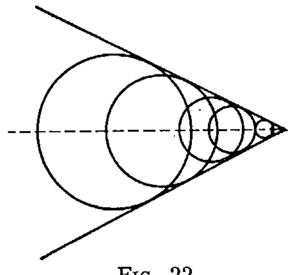


FIG. 21

Aberración esférica. Tomemos una lente de gran abertura, por ejemplo una de las dos de un gran condensador de arcos (muchas no están corregidas); todos los rayos de luz que parten de un foco puntual de su eje principal dan una cáustica, es decir, se cortan sobre una superficie cónica de generatriz curvada y un segmento del eje principal, cuyas secciones por el plano del dibujo están representadas en la figura 20. Las secciones de estas cáusticas, por planos normales al eje principal, se ven debajo en línea gruesa; la distancia $A'A'_m$ se llama *aberración longitudinal*, mientras que la $A\ A'$ se llama *aberración transversal* (¹); cuando el foco de luz es tal que los rayos coinciden sobre la lente paralelos al eje principal, estas aberraciones se llaman *principales*, y la figura 21 muestra la primera, que es la que tiene más importancia para una lente convergente y una divergente. Esta aberración no puede anularse para una sola lente, y depende del índice del vidrio de que está hecha la lente, y de la relación entre los dos radios de las esferas a que pertenecen sus superficies; para un índice dado, por ejemplo para $n = 1{,}5$, esta relación de los radios que da el mínimo valor a la aberración vale 1/6, y es menor cuando la luz incide por la cara más curvada, o sea la que tiene menor radio y mayor abombamiento; en el caso de lente planoconvexa la luz debe penetrar por la cara curva para disminuir la aberración, y será siempre tanto menor cuanto mayor sea el índice, para una distancia focal dada.


FIG. 22

Cuando, como es el caso de un objetivo, existen varias lentes, la aberración del conjunto puede hacerse muy pequeña y prácticamente anularse, pues se compensan entre sí las de cada una; pero, el cálculo es muy difícil y sólo aproximado.

Además de esta aberración esférica hay la *coma* o *penacho*, que se llama así por su aspecto y que se produce con rayos oblicuos; su co-

(¹) Los cortes 5 y 3 de la parte inferior de la figura 20 representan concentraciones de luz.

rrección, sin embargo, es más fácil si, como veremos al tratar de objetivos, éste cumple otra condición. La figura 22 representa el desarrollo de la misma y su atenuación del penacho a la parte más abierta.

Curvatura o abombamiento de la imagen. Este defecto se manifiesta porque al recoger la imagen de un objeto en una pantalla plana, cuando se desplaza ésta a lo largo del eje principal y normalmente a él, hay una posición en la que está enfocado el centro y desenfocada la parte marginal de la imagen, y otra en la que sucede lo contrario, y en las intermedias van quedando enfocadas regiones intermedias de la imagen entre aquellas extremas. Su origen es debido a que la imagen de un objeto plano dado por una lente no está toda situada en el plano conjugado de aquél, sino en una superficie abombada (algo así como una hoja de cebolla) que es tangente a ese plano en el punto donde corta al eje principal (fig. 22 bis), y, por consiguiente, lo que recibimos en la pantalla es una imagen proyectada de la verdadera en dicha pantalla; claro está que este defecto será tanto menos acusable cuanto menor sea la abertura de la lente o sistema, y es también uno de los defectos más importantes de observar si está eliminado en un objetivo de proyección; porque, además del citado desenfoque desigual de las distintas zonas de la imagen en la pantalla, esta aberración lleva como correlativa una *deformación de la imagen*, cuya causa es precisamente el haber proyectado sobre un plano la imagen de una superficie curva.

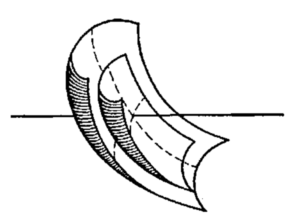


FIG. 22 bis. Representación de dos imágenes abombadas correspondientes a dos longitudes de onda distintas, y explicación de la irisación de las imágenes en los bordes

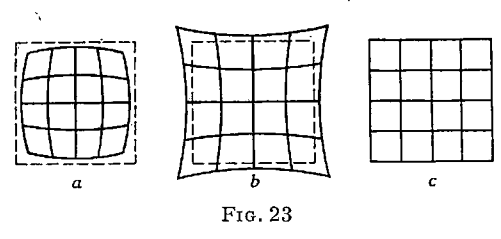


FIG. 23

Esta deformación o distorsión, como también se le llama, puede presentar dos aspectos muy distintos: *deformación con contracción* o en *barrilete*, como en la figura 23 *a*, y *deformación con dilatación* o en media luna, como en la figura 23 *b*; lo cual depende del sentido en que la curvatura dé la verdadera imagen (o situada sobre la hoja de cebolla que antes hemos supuesto) con respecto al centro óptico de la lente. Estas dos figuras son las imágenes que se obtienen de una cuadrícula como la de la figura 23 *c*, en el caso de que haya deformación por esta causa. Este tipo de deformación o aberración se suprime empleando diafragmas que limiten los rayos que pasan por el sistema a su región central (por lo que sólo serán claramente perceptibles en sistemas de gran diámetro), o bien asociando lentes de radios de curvatura e índices distintos, como se realiza en los objetivos de proyección; en ellos,

esta deformación no tiene consecuencias graves, como veremos después, y cuando un sistema óptico carece de este último tipo de deformación, se dice que satisface a la *condición de ortoscopia.*

Aberración cromática. Este tipo de deformación no tiene, como los anteriores, un carácter marcadamente geométrico, sino que es más bien de naturaleza física y causado por la dispersión de la luz de que ya hemos hablado antes. Consideremos una lente convergente y luz policromática o blanca, incidiendo paralelamente sobre ella al eje principal; según dijimos al principio, la distancia focal venía dada por

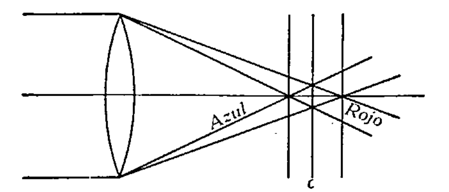


FIG. 24. Aberración cromática de posición

$$\frac{k}{f} = (n - 1);$$

pero puesto que el índice n es variable con la longitud de onda, resultará que también lo será la distancia focal para las distintas longitudes de onda, y, por consiguiente, el foco para la luz violeta de más corta longitud de onda y que se desvía más de la dirección de incidencia, estará más cerca de la lente que el correspondiente a la luz roja; el resultado será (fig. 24) que si colocamos una pantalla en la posición que corresponde al foco azul, la imagen aparecerá coloreada en el borde de rojo, porque en esa posición los rayos rojos todavía no se han reunido y presentan un cono más abierto, mientras que en la posición del foco rojo los bordes estarán coloreados de azul por idéntica razón. Cuando un objetivo no está bien corregido de *acromatismo,* las imágenes presentan irisaciones en los bordes, es decir, aparecen coloreadas en las regiones marginales y, por tanto, con los contornos poco definidos: en la posición intermedia este defecto queda muy atenuado.

Puesto que es el índice del vidrio el que determina este defecto y dado que la luz usual, al menos en la proyección, es blanca o no homogénea, en lo que a longitud de onda se refiere, se deduce en primer lugar que, para compensar este defecto, habrá que asociar varias lentes con distintos índices de refracción, que en su conjunto lleven a coincidir las imágenes (en este caso los focos) para dos colores (algunos objetivos llamados apocromáticos están corregidos para tres colores) preelegidos; se dice entonces que el sistema está *acromatizado* para esos dos colores.

En segundo lugar, y puesto que la luz blanca que se emplea en casi todos los aparatos de óptica y, en particular, en los objetivos de proyección, da un espectro continuo, habrá que elegir determinadas longitudes de onda para corregir este defecto; todos los colores cuya longitud de onda está comprendida entre esos dos colores no podrán producir coloración en la imagen (al menos dentro de la región de

dispersión normal para el cual el índice varía siempre en el mismo sentido con la longitud de onda), pero sí los colores que estén fuera de ese intervalo de longitudes de onda; esos colores, que entonces puede tener la imagen en el borde bajo la forma de irisaciones, forman el *espectro residual o secundario.*

Los colores elegidos en casi todos los instrumentos son el azul de $\lambda_F = 4861{,}4$ del hidrógeno y el rojo de $\lambda_C = 6562{,}8$ UA, también del hidrógeno. En todo caso, habrá que buscar vidrios en los que el índice varíe mucho; pero en lugar de emplear el índice de refracción en estas correcciones de aberración cromática, se usa otro número que relaciona los índices de un mismo vidrio, para esas dos longitudes de onda-tipo que hemos dado antes y la amarilla del sodio tantas veces citada, que se llama su *poder dispersivo* y vale

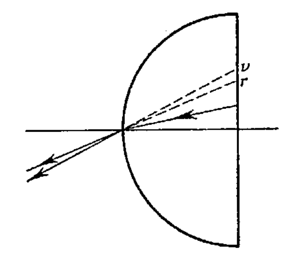


FIG. 25

$$\frac{n_F - n_C}{n_D - 1} = \frac{1}{\nu}$$

donde n_F, n_C y n_D son los índices para aquellas tres longitudes de onda. Su importancia proviene de que el valor inverso mide la aberración cromática relativa, es decir,

$$\frac{f_C - f_F}{f_D} = \nu$$

Para que el lector tenga una idea, indicaremos que es principalmente para corregir esta aberración para lo que se usan las dos variedades de vidrios de que antes hemos hablado, ya conocidas como *crown* y *flint*, y que para una lente de 10 cm de foco se tiene:

con crown $f_r - f_v = 1{,}7$ mm } f_r es la distancia focal para el rojo y
con flint $f_r - f_v = 2{,}7$ mm } f_v es la distancia focal para el violeta.

Cuando hablemos de los objetivos de proyección indicaremos el modo de comprobar esta aberración en ellos.

Además del efecto de coloración hay otro efecto de tamaño en la imagen, aunque menos perceptible, de la que conviene tenga conocimiento el lector, y que se deduce de la figura 25, aun cuando dentro de su campo de aplicaciones se le presentará raramente.

Difracción de la luz y poder separador. Cuando se quiere comprobar la propagación de la luz en línea recta, el procedimiento más elemental que se nos podría ocurrir consistiría en hacer un pequeño orificio en una pantalla u hoja de papel y observar la luz que procedente de un foco de luz pasa a través de ese orificio y se recoge en otra pantalla; pues bien, si el orificio que hicimos tiene unas dimensiones comparables a la longitud de onda de la luz incidente (el fenómeno se observa

mucho mejor con luz monocromática), la idea exacta que tenemos formada de esa propagación en línea recta, queda desmentida al observar que junto a la imagen del orificio (fig. 26) que se obtiene por ese tipo de propagación, aparecen rodeando a esa imagen una serie de anillos brillantes y oscuros, cada vez más difuminados, hasta que acaban por desaparecer y que parece que sólo pueden producirse por una incurvación de los rayos; este fenómeno y otros semejantes que se producen al pasar la luz por una rendija muy estrecha, recibe el nombre de *difracción* y tiene una gran importancia, porque influye mucho en la distancia mínima a que es posible distinguir como separados dos puntos dibujados sobre un papel, y en que las imágenes proyectadas sobre la pantalla del cine, suficientemente ampliadas, no aparezcan borrosas. En la misma figura hemos dibujado en relieve la curva de intensidades de luz según un corte de la imagen del orificio por un plano $A\ A'$ que pase por el centro de dicha imagen; se ve que hay un máximo para la imagen del orificio tal como se obtendría sensiblemente trazando el cilindro de rayos de luz que contornean el orificio de la pantalla limitadora de la luz; y, luego, una serie de máximos cada vez más pequeños que corresponden a aquellos anillos. Mediante cálculos, que no son del caso para la finalidad que perseguimos, se puede demostrar que el radio de la imagen o mancha central está dado por

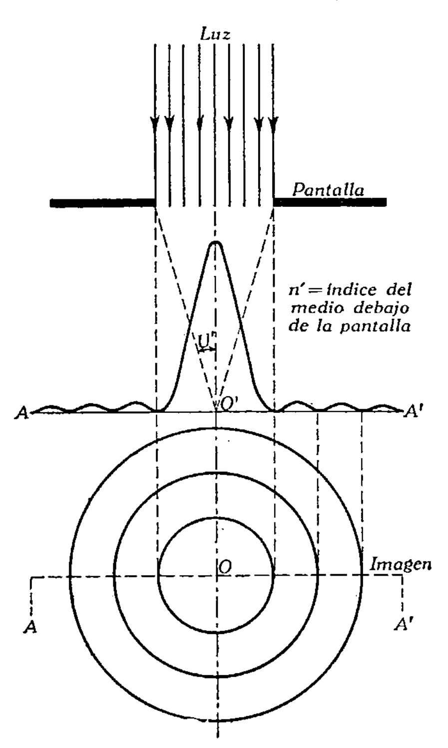


FIG. 26. Mancha de difracción de un orificio; en el centro, una sección por $A\ A'$ del sólido de difracción relativo a intensidades

$$\delta' = 1{,}22\,\frac{\lambda}{2\,n'\ \text{sen}\ U'};\quad (\lambda = \text{longitud de onda de la luz})$$

en la que n' es el índice de refracción del medio interpuesto entre ambas pantallas, y todas las demás letras tienen el significado marcado en la figura. Imaginemos ahora un sistema óptico cualquiera, que puede ser el objetivo de proyección o el del sonido u otro cualquiera; dos puntos del objeto A y B darán cada uno una imagen A' y B' con sus corres-

pondientes anillos de difracción, las intensidades de luz en la imagen dadas por ambos puntos se sumarán, y el aspecto o sección, en relieve como antes, de dichas intensidades, se obtendrán, como se indica en la figura 27, en trazo lleno, sumando las de los dos puntos imágenes A' y B', y si el valle que existe entre ambos no es suficientemente profundo, el ojo no será capaz de diferenciar el uno del otro; *se admite convencionalmente* que la mínima distancia entre A' y B' para que puedan percibirse como separados esos puntos (ya que ese valle es tanto más profundo cuanto más distantes están A' y B'), es la que hace que el máximo de A' caiga precisamente en el primer mínimo de B' y recíprocamente, tal y como aparecen en la figura; es decir, que la distancia entre ambos puntos-imágenes es precisamente igual al radio de la mancha central que antes hemos determinado δ'. Pero ese radio está ligado o relacionado con la distancia que separa los puntos objeto correspondientes A y B, de tal modo que la *mínima distancia* que debe haber entre éstos para que sus imágenes cumplan esa condición, está dada por

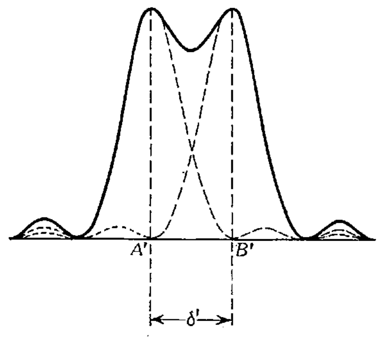


FIG. 27. Condición que limita el poder separador

$$\delta = \frac{0{,}6\,\lambda}{n \cdot \operatorname{sen} U}$$

en la que n es el índice del medio objeto y U el ángulo bajo el cual se ve el objetivo desde el punto A (¹). Cuando los dos puntos A y B se encuentran más próximos que esa distancia, es convencionalmente imposible distinguir el uno del otro y se deben considerar como un solo punto, y, por consiguiente, cuanto menor sea esa distancia δ, tanto mejor será el sistema óptico que produce aquellas imágenes. Tal convenio es fruto de la experiencia.

Esta distancia mínima se llama *poder separador o poder de definición del instrumento u objetivo* en cuestión; y, como vemos, depende del fenómeno de *difracción;* depende también de las *aberraciones* de objetivo, de que ya hemos hablado antes, y, por último, de la *estruc-*

(¹) Basta aplicar la *condición de los senos*, de que hablaremos al tratar de los objetivos. Si se trata de incidencia en luz paralela, esta última relación se convierte en

$$\varepsilon = \frac{0{,}6\,\lambda}{nR}$$

donde ε es la *distancia aparente*, o ángulo bajo el cual se ven aquellos puntos A y B desde el centro del diafragma, y R el radio de ese diafragma.

tura o grano de la pantalla sobre la que se recoge la imagen, y de la *agudeza visual* del ojo del observador. Cuando estudiemos los objetivos y el ojo humano veremos los valores que toma en cada uno de ellos.

El ojo humano. Siendo el órgano de la visión del que nos servimos para observar el cine, y aprovechando éste uno de los defectos de aquél para obtener una impresión de realismo de las escenas que se desarrollan en la pantalla, es natural que digamos algunas palabras sobre el mismo, así como después lo haremos del oído.

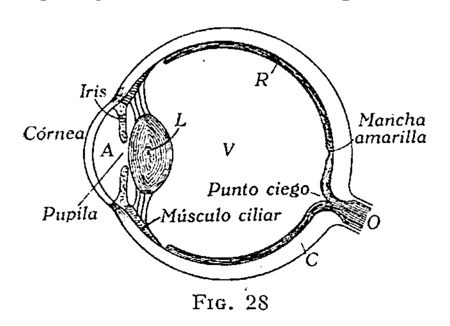


FIG. 28

Está constituído (fig. 28) por una cámara esférica con una abertura circular en su parte anterior; por medio de un sistema de lentes, la luz entra en esta abertura, formando una imagen en la parte posterior, al igual que una cámara fotográfica. Una sección del mismo muestra una capa exterior llamada *esclerótica* o blanco del ojo *C*, la cual tiene en su parte anterior una abertura transparente llamada *córnea; L* es el cristalino, especie de lente que está sujeta en las paredes del ojo por los músculos *ciliares.* Delante de la lente está un diafragma coloreado, llamado *iris* y es el que da el color a los ojos. En el centro del iris hay una pequeña abertura circular llamada *pupila.* El espacio *A* entre el cristalino y la córnea está lleno de un líquido acuoso que tiene una pequeña cantidad de sales en solución y se llama *humor acuoso.* El espacio *V* detrás del cristalino o cámara posterior, está lleno con una substancia transparente gelatinosa llamada *humor vítreo.*

Después de pasar a través de todos estos medios, un rayo de luz viene a caer en la *retina R,* la cual consiste en una red de fibras nerviosas conectadas con el cerebro por el nervio óptico *O.* En la retina hay dos clases de células de visión llamadas *conos y bastoncitos;* directamente detrás de la pupila está en la retina la *mancha amarilla,* que tiene una depresión en el centro llamada *fovea centralis,* en la que la visión es máxima, no habiendo ningún bastón en la fóvea; por el contrario, el punto de la retina por donde entra el nervio óptico se llama *punto ciego,* porque es insensible a la luz.

Cuando el ojo está en reposo se encuentra ajustado de modo que un objeto muy alejado está enfocado sobre la retina; es decir, que su imagen se forma sobre su superficie; pero si se mira a un objeto cercano, su posición debe alterarse a fin de acomodarse para que el objeto se vea claro, o, lo que es lo mismo, que también se forme la imagen en la retina. Esto se logra mediante un movimiento hacia delante del cristalino y un aumento de la curvatura de sus superficies, siendo limitada la zona de acomodación. El ojo normal ve los objetos lo mejor po-

sible cuando éstos se encuentran a unos 25 a 30 cm de distancia, que se llama por eso de la *visión distinta;* si el objeto se encuentra más cerca, se requiere hacer un esfuerzo para enfocarlo, y si está más alejado, aunque se distingue claramente, aparece más pequeño y no pueden verse tan bien los detalles.

El cristalino es una lente biconvexa y sin color, constituído por varias capas de distinta densidad, de las que la más exterior es menos densa y la interior la más densa, variando su índice desde 1,404 hasta 1,454; el índice del humor acuoso y vítreo es sensiblemente el mismo e igual a 1,34 y muy aproximado al de la córnea. En consecuencia, cuando un rayo de luz penetra en el ojo experimenta tres refracciones fuertes además de la continua que sufre al atravesar el cristalino: en la superficie exterior de la córnea y en las dos caras del cristalino. Los dos focos principales del ojo se encuentran uno delante de la córnea, a 13,7 mm, y el otro en la retina, a 22,8 mm. La imagen formada en la retina es invertida, pero por la impresión fisiológica y educación psicológica, refiere estas imágenes a su verdadera posición. Como todo sistema óptico, el ojo posee aberración esférica y cromática; cuando el ojo está ajustado para luz paralela, el rayo violeta tiene el foco 0,43 mm más cerca del cristalino que el foco del rojo; esto se observa muy bien con ciertas clases de cristal de cobalto, que dejan pasar solamente el azul y violeta y la región más extrema del rojo en el espectro. Si se mira a través de él al filamento de una lámpara eléctrica colocada alejada, el ojo enfoca involuntariamente la imagen roja, que aparece rodeada de un halo azul-violeta. Si el filamento se encuentra muy cerca, no puede el ojo enfocar al rojo y aparece la imagen azul-violeta con halo rojo.

La percepción neta o limpia de los objetos está, como hemos dicho, limitada a la mancha amarilla; las otras porciones de la retina pueden percibir los objetos, pero de una manera poco precisa, y se dice que para ella la *visión es indirecta.* Gracias al movimiento de rotación del ojo, extremadamente fácil dentro de su órbita, se puede lograr que cualquier objeto venga a dar su imagen sobre el eje y ser visto con precisión; se dice entonces que para ellos hay *visión directa.*

Agudeza visual. La sensación de distancia de dos puntos depende de la distancia de sus imágenes retinianas; esa distancia es proporcional al ángulo de los dos rayos medios de los haces enviados por esos puntos al ojo; este ángulo es pequeño, ya que la región de sensibilidad de la retina también lo es, y se le llama *distancia aparente* de los dos puntos. Para un objeto cualquiera la distancia aparente de sus extremos se llama *diámetro aparente.* En virtud de las aberraciones, difracción y estructura celular de la retina, esta noción de distancia aparente carece de sentido cuando el ángulo e es muy pequeño, es decir, el ojo normal no distingue entonces los puntos como separados; *en la práctica* un ojo normal no distingue dos puntos cuya distancia aparente es inferior a un minuto de ángulo. Este ángulo corresponde a la distancia de 0,1 mm de distancia entre dos puntos situados a 30 cm del

ojo, y entonces se dice que el ojo tiene una *agudeza visual igual a uno.* La agudeza visual de un ojo cualquiera varía en razón inversa de ese ángulo límite, y se mide observando letras que se alejan del ojo hasta que no se las puede distinguir. La forma de los objetos observados, así como las condiciones de iluminación, fatiga del ojo, etc., influyen en el valor de esa agudeza; así la agudeza de un ojo normal mirando en un microscopio disminuye hasta dos a cuatro minutos de arco. Digamos, por último, que se ha comprobado experimentalmente que la imagen formada en la retina de un objeto y que se debe a una substancia llamada *púrpura retiniana o eritrocsina*, persiste en la misma durante 1/15 de segundo de tiempo, de tal modo, que si presentamos ante el ojo una imagen nueva antes de transcurrir dicho tiempo con respecto a la época en que se escamoteó la imagen anterior, no se percibe esta segunda imagen, sino que persiste la impresión de la primera hasta después de transcurrido dicho período; esto es una especie de inercia del ojo, que ha servido de base al cine y que, como veremos, poseen también en una cierta medida las células fotoeléctricas que se usan para el sonido.

Poder de definición de ojo. Acabamos de ver que experimentalmente se ha determinado su valor y fijado aproximado en 1′ pero, de todas las causas que al hablar de la difracción dijimos podían limitar este poder, nos interesa saber cuál es la que tiene influencia preponderante, y esto no sólo en el ojo, sino también en fotografía y en la pantalla de cine.

Para el ojo, y limitándonos a la difracción, suponiendo, como hemos dicho, que el radio de la pupila vale 2 mm, y tomando la media de longitudes de onda del espectro visible correspondiente a la luz blanca $\lambda = 0,5$, de la expresión dada antes, se encuentra:

$$\varepsilon = \frac{0,3}{2000} \simeq 30''.$$

Este resultado, como se ve, corresponde sensiblemente al doble de la agudeza visual que da la experiencia; pero ello no tiene nada de extraño: en primer lugar, el radio de la pupila no es fijo, y de otra parte la agudeza visual parece más bien limitada por las aberraciones y por la estructura celular de la retina. En relación con esta última, para que dos imágenes retinianas sean distintas, parece necesario que las dos células impresionadas estén al menos separadas por una célula no impresionada, y, por consiguiente, la distancia entre dos imágenes es por lo menos igual al diámetro de una célula. Si tomamos 4μ para este diámetro, se encuentra, para la distancia mínima aparente de los dos puntos separados, el valor de 53″, más aproximado a un minuto, que fué el valor hallado antes, pero probablemente demasiado grande. Por último, hagamos notar que los valores anteriores referentes a la difracción, se han calculado a base de focos puntuales y, por tanto, sin dimensión, lo que no es real; en definitiva, *los fenómenos de difrac-*

ción no limitan el poder separador del ojo, sino que es más bien la estructura celular de la retina quien lo limita.

La visión de los colores y el efecto Purkinje. Mediante aparatos que no es del caso describir, se ha construído una curva que da la luminosidad observada por el ojo para las distintas radiaciones o colores, empleando un arco eléctrico como foco de luz; desgraciadamente, la distribución de la energía en el espectro de dicho arco es desconocida. y los valores obtenidos tienen sólo un valor relativo, pero tal curva

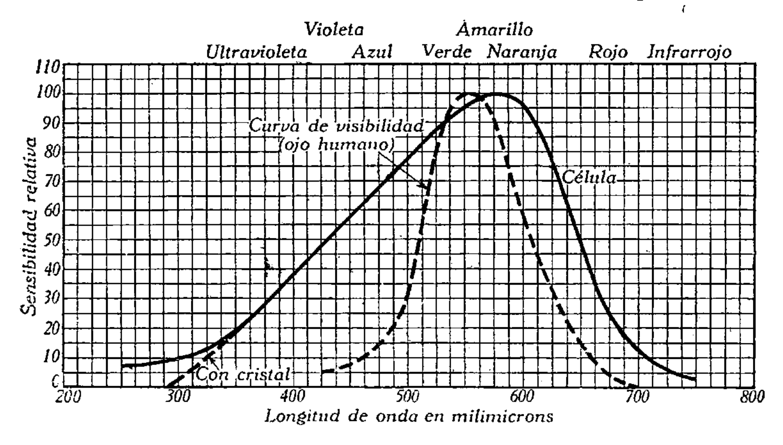


FIG. 29. Célula fotoeléctrica Weston photronic, curva de sensibilidad espectral

ha sido determinada más recientemente por Ives, empleando como foco de luz una lámpara en que el filamento es tungsteno del que sí se conoce perfectamente su emisión para una temperatura de color dada; de este modo, la luminosidad tiene un valor preciso, y así se ha llegado a la curva de la figura 29, en la que se ve que la máxima sensibilidad del ojo está en la región amarilla cerca de las líneas *D* del sodio. Si al observar el espectro para la construcción de esa curva se disminuye gradualmente la rendija del espectroscopio en anchura y el espectro se hace más débil en intensidad, se observa que el máximo brillo se desplaza del amarillo hacia el verde. La distribución de la energía en el espectro es siempre la misma, pero cuando la luz es muy débil el ojo es más sensible al azul y verde que al amarillo; este fenómeno se conoce con el nombre de *efecto Purkinje*, y se comprende el interés que tiene para la cinematografía en color. El cambio se efectúa en un intervalo de luminosidad de 150 a 0,03 bujías-metro. Si la luminosidad del espectro se aumenta por encima de aquel valor o se disminuye por debajo de este otro, el efecto anterior no se realiza.

Según von Kries, este efecto puede explicarse suponiendo que los bastones de la retina son los que dan la visión a bajas intensidades, mientras que los conos la dan con intensidades altas; los conos son sensibles al color y tienen su máxima sensibilidad para el amarillo,

mientras que los bastones no son sensibles al color, pero tienen un máximo de sensibilidad para la longitud de onda verde y pueden considerarse como la forma superviviente de la más elemental forma de visión. El efecto Purkinje se aplica enteramente a la apariencia verde azulada de los objetos a la luz de la luna.

Si una luz coloreada disminuye gradualmente de intensidad, se convierte en incolora en un pequeño intervalo, justamente antes de extinguirse, al cual se llama *intervalo acromático*. Esto puede demostrarse con una lámpara incandescente, con un reóstato cuya resistencia vamos aumentando gradualmente hasta que desaparezca la luz, y procurando que la luz sea difusa. El experimento debe hacerse en cámara oscura, y se ve que cuando la corriente decrece, la luz se hace rojiza y débil, pero un poco antes de desaparecer se vuelve gris.

También se ha podido comprobar que se puede obtener la sensación de un color cualquiera a partir de la superposición de tres colores que se han llamado por eso *colores fundamentales:* el rojo, el verde y el azul; superponiendo en relativa intensidad estos tres colores, es posible obtener la luz blanca y también un color cualquiera, aunque la teoría de su explicación está muy lejos de alcanzarse; también existen *colores complementarios;* esto es, que se puede lograr luz blanca a partir de la superposición de dos colores determinados, que reciben aquel nombre, por ejemplo: rojo y verde azulado, o amarillo y azul oscuro, etc. En esto se funda uno de los sistemas del cine en tecnicolor.

Visión binocular. Cuando se mira a un objeto cercano, las líneas de visión de los dos ojos deben converger en el objeto y se requiere hacer un esfuerzo muscular de acomodación. La magnitud del esfuerzo desarrollado nos ayuda a darnos una idea de la distancia del objeto, pero la base de esta idea nos la da el hecho de que las dos imágenes del objeto formadas en la mancha amarilla de cada ojo son distintas, porque también es distinto el punto de vista. Esta diferencia de las dos imágenes va asociada a la idea de las tres dimensiones o solidez del objeto. Si las dos imágenes son exactamente iguales como cuando se mira a un cuadro, las dos imágenes de ambas retinas se superponen exactamente, y se obtiene la sensación del plano, desapareciendo el relieve. Los intentos de cine en relieve, fundados en esta propiedad, no parecen hasta ahora haber tenido éxito.

III. El sistema de proyección

El sistema de proyección. Está constituído por un *foco* productor de lúz, un *colector* que recoge la luz producida por el foco y la concentra sobre una ventanilla, delante de la cual pasa la película, llamada *apertura* o ventanilla de proyección, y que forma parte del *proyector o crono* propiamente dicho; un *obturador*, que también forma parte del crono y destinado a cortar el flujo de luz que sale a la pantalla después de atravesar la película, cuya misión efectúa mientras está la película en movimiento; un *objetivo* de proyección, que recoge el flujo de luz que por transparencia ha pasado a través de la película, para lanzarlo sobre la pantalla, y, por último, la *pantalla* donde se recoge la imagen que contempla el espectador. Todos estos elementos se coordinan entre sí de tal modo que de su ajuste correcto y de una adecuada elección de cada uno de ellos depende el que la calidad de la proyección obtenida sea excelente o bien desmerezca de valor por el solo hecho de que uno de los elementos de esta cadena no esté en consonancia con la eficacia de los demás. Requiere, pues, cada uno un examen particular, según el papel o función que deben desempeñar, para después hacer su estudio en conjunto y lograr las mejores condiciones de trabajo del sistema de proyección. De ellos, algunos como el obturador y la apertura se incluirán en el estudio que haremos del proyector, mientras que de los demás vamos a hacer un somero estudio aisladamente.

Como elemento accesorio de esta cadena se encuentra, además, el *mecanismo de vistas fijas* o linterna de *diapositivas*, y los distintos sistemas de anuncios actualmente en uso, que en América suele estar desglosado del crono, pero que en España forma casi siempre parte de dicho crono.

Para quien desconozca en absoluto el fundamento de la proyección cinematográfica, la figura 30, que es esquemática, le dará una noción clara de cómo trabaja el sistema de proyección. Supuesta en ella la película en reposo, la luz que por transparencia atraviesa esta película, estando el obturador abierto, sale de la película modulada, por así decir, o sea que la sección del cono de luz que lanza el objetivo sobre la pantalla después del paso por la película no tiene ya una distribu-

ción uniforme de iluminación, sino que se ajusta a la transparencia que en cada elemento de superficie presentaba la película, y, por consiguiente, reproduce sobre la pantalla todas las figuras que había en la película, a mayor escala naturalmente.

Recordemos ahora que, según dijimos al hacer el estudio del ojo humano, las imágenes sólo persisten en la retina 1/15 de segundo aproximadamente. Si una vez presentada una imagen al observador la reemplazamos antes de un quinceavo de segundo por otra imagen, el

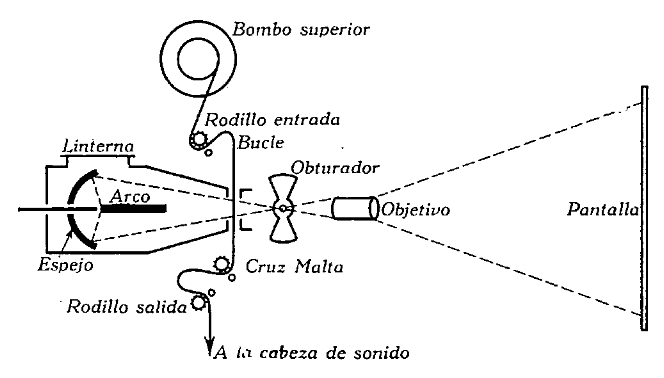


FIG. 30. Esquema del proyector

observador percibirá la segunda imagen como continuación de la primera, sin solución de continuidad, y si esta segunda imagen es idéntica a la primera, salvo un ligero desplazamiento de alguna de sus figuras, para él el resultado será el mismo que si tal figura hubiese efectuado ese pequeño desplazamiento. La única dificultad estriba en mover la película con suficiente rapidez para que cada imagen permanezca delante de la ventanilla menos de 1/15 de segundo y, además, que todas las imágenes que sucesivamente van apareciendo en la ventanilla sean observadas en reposo por el espectador. Ello se consigue dando a la película un movimiento tal que desfilan delante de la ventanilla no 15 imágenes, que sería justamente el tope de velocidad para la permanencia durante 1/15 de segundo, sino 24 imágenes, con lo que cada una permanece quieta 1/24 de segundo, y la sensación de movimiento es más continua y exacta. Pero, además, su movimiento se sincroniza con el del obturador, de tal modo que mientras se pasa de una imagen a la siguiente, el obturador intercepta la luz que llega a la pantalla, y cuando destapa, la nueva imagen se encuentra quieta en la ventanilla; de este modo, el ojo no ve nunca el movimiento de la película, y basta observar el rodillo de la cruz de Malta que arrastra la película, para darse cuenta que no se aprecia su movimiento, sino sólo una ligera vibración, que procede, en este caso, de la falta de obturación. Entre dos posiciones dadas de un objeto que se mueve, en la imagen existen el mismo número de cuadros o imágenes al tomar

las fotografías, que el número de las que se proyectan, y ambas corresponden a 24 imágenes por segundo. La manera de lograr tales condiciones en la mejor medida posible la vamos a hacer a continuación en el estudio del proyector y demás elementos de que antes hemos hablado, que agruparemos en la siguiente forma:

a) El foco de luz.
b) El colector de luz.
c) La linterna.
d) El proyector o crono.
e) El objetivo de proyección.

Aun cuando en su mayor parte ese estudio ha de referirse a equipos para película de 35 mm, siempre que haya oportunidad haremos referencias al caso de 16 mm y aun de 8 mm, indicando las características diferenciales más acusadas.

Generalidades sobre el sistema de iluminación. Es evidentemente uno de los factores más importantes en conexión con la proyección. En primer lugar, debe tener una intensidad suficiente para que bastante luz sea proyectada en la pantalla (después de haber pasado por todos los sistemas antes mencionados), a fin de que produzca una luz reflejada de una intensidad de 10 lamberts-pies (menos uno, más cuatro). Debe tener también el contenido de color adecuado para obtener un realismo conveniente. Muchos años se han invertido en trabajo de desarrollo y experimental para la standardización de carbones de alta intensidad para arcos a fin de obtener la adecuada intensidad y el deseado color blanco de nieve. La intensidad del foco de luz, en orden a obtener resultados satisfactorios, depende grandemente del tamaño de la imagen proyectada, y es fuertemente afectada por la distancia del objetivo de proyección a la pantalla.

Los siguientes datos pueden tomarse como guía para determinar el mejor foco de luz:

Máximo tamaño de la pantalla	Alta intens. Corriente del arco	Tamaño carbones (¹)	
		Positivo	Negativo
12×16 pies (3,66 × 4,88 m) (192 pies²) = 18 m²	40 A	7 mm × 12″	6 mm × 9″
15×20 pies (4,57 × 6,10 m) (300 pies²) = 28 m²	48 A	7 mm × 12″	Orotip C 6 mm × 9″
18×24 pies (5,5 × 7,32 m) (432 pies²) = 40,26 m² ...	62 A	8 mm × 12″	6,5 mm × 9″
21×28 pies (6,40 × 8,54 m) (588 pies²) = 54,65 m² ..	130 A	13,6 mm × 22″	7/16″ × 9″
Más grande	180 A	13,6 mm × 22″	7/16″ × 9″ D. C. C.

(¹) El primer número indica el diámetro y el segundo la longitud.

Nota. Cuando se empleau objetivos con superficies tratadas ópticamente y condensador con rapidez superior a f/2,3, el ancho de la pantalla puede aumentarse unos 2 pies aproximadamente (61 cm).

Hace algunos años, en 1939, se ha lanzado al mercado un foco de luz (Cyclex Ashcraft) que consume, con poca corriente, carbones de alta intensidad de un manantial de energía eléctrica de más alta frecuencia con considerable éxito. Su principal ventaja con respecto a las linternas de carbón de baja intensidad, radica en su superior intensidad de luz y color a un precio de coste de su funcionamiento no superior al de aquéllas. Sin embargo, la introducción de linternas de alta intensidad a 40 amperios en corriente continua ha reducido algo su superioridad.

El diseño eléctrico y mecánico de una linterna de arco debe ser tal que sostenga un arco permanente, manteniendo el cráter del arco en el foco del sistema, incluyendo un conjunto óptico eficaz y un adecuado método de ventilación. Un arco estable se obtiene mediante un mecanismo de control que mueva los carbones, de tal modo que mantenga constante el espacio entre los dos. Cada carbón debe desplazarse a velocidad diferente, dependiendo ésta de sus características de combustión. También se ha hecho uso de electroimanes y otros sistemas para mantener el cráter constantemente en su propia posición.

Dos tipos de *sistemas ópticos* se usan para cubrir enteramente la apertura del proyector: el tipo de *condensador* para linternas de alta intensidad y el tipo de *reflector* para las otras, de modo a mantener el cráter en el foco. Uno de los más graves problemas de estos sistemas ópticos es el prever procedimientos que protejan el equipo óptico del deterioro producido por el calor y por las partículas desprendidas del cráter y proyectadas sobre tales vidrios. Naturalmente, es importante disponer de medios para que el calor del arco se disipe eficazmente de tal manera que no afecte a la estabilidad del cráter.

Es, desde luego, también importante disponer de los medios adecuados para el fácil ajuste del sistema óptico y dispositivo de control del arco, de tal modo, que el operador pueda mantener el objetivo en su propio ajuste en todo tiempo y en las condiciones normales de trabajo.

Hay hoy un gran número de locales que emplean linternas con arcos de baja intensidad. Es generalmente admitido, no obstante, que el contenido de color de estos focos de luz no es adecuado para una proyección satisfactoria, particularmente para películas en color; y la reciente introducción de arcos de alta intensidad trabajando a baja corriente y a precios económicos permitirá la sustitución apenas las circunstancias actuales lo permitan. En casi todos los casos se requiere corriente continua para los arcos, lo que lleva consigo muchas veces, dada la tendencia a abolir la red de corriente continua, el empleo de un equipo de conversión (de alterna en continua); este equipo puede ser de motor generador o bien rectificador. Los de este último tipo, que pueden ser secos o de válvula, deben resultar tan eficaces como sea posible durante un largo período de tiempo, para disminuir en lo posible los gastos de funcionamiento y al mismo tiempo mantener

una estabilidad de la corriente continua de los arcos poco sensibles a las variaciones de tensión de entrada de la corriente alterna. Más adelante nos ocuparemos de ellos.

Deflector del aire

En la abertura del mecanismo proyector se crea una considerable cantidad de calor, cuando se emplean focos de luz intensos. Aparte de la posibilidad de incendio, es extremadamente importante que este calor sea disminuído a fin de que no abarquille la película, produciendo un desenfoque de la parte central de la película. Se han ideado diferentes tipos de sistemas de enfriamiento, y, en algunos casos, el deslizamiento de aire necesario para disminuir el calor en la apertura puede ser tal que afecte la estabilidad del arco en el foco de luz. En estas condiciones se ha encontrado práctico colocar un *deflector de aire* o vidrio resistente al calor entre el foco de luz y el obturador posterior. Tiene, no obstante, el inconveniente de que reduce la intensidad de la luz transmitida por la totalidad del sistema en un 8 %. Aun así, el deflector de aire es ventajoso en muchos casos, ya que es preferible tener esa pérdida de luz a tener un arco inestable. Además, se ha encontrado que, en una cierta medida, este deflector de aire dispersa la luz en una medida tal, que se obtiene en la pantalla una distribución de luz más uniforme.

El foco de arco (1)

Existen dos sistemas distintos esencialmente como focos de luz para la proyección de la imagen de la película sobre la pantalla, cuyo empleo está hoy perfectamente caracterizado según el tipo de película empleada; de un lado el arco eléctrico conocido desde muy antiguo aplicado casi exclusivamente en películas normales de 35 mm, y de otro lado, las lámparas incandescentes, casi limitadas a películas de 16 y 8 mm.

El arco eléctrico. Es el más antiguo y potente medio de iluminación, y por ello es natural que también sea el más difundido en la proyección de cine; he aquí en qué consiste: Si se toman dos varillas de carbón y se conectan a una batería de unos 70 a 80 V, uniendo los extremos libres de ambas varillas, al separar éstas ligeramente, se produce una descarga brillante entre ambas puntas. Al pasar la corriente del carbón unido al polo positivo de la batería o carbón positivo al unido al polo menos de la misma o carbón negativo, ambos se queman: el positivo, ahuecándose en su extremo, en donde se forma

(1) La mayor parte de la información de este apartado se debe a la cortesía de la National Carbon C° Inc., cuya distribuidora exclusiva en España es Western Electric C° of Spain.

un pequeño *cráter*, y el negativo, apuntándose, y consumiéndose (en el caso de carbón ordinario) el positivo a una velocidad aproximada al doble que el negativo, lo que depende de la naturaleza del carbón. La mayor parte de la luz se origina en el cráter y contribuye con un 85 %; mucho menos luz sale del negativo y menos aún del vapor entre ambos electrodos. La temperatura del cráter determinada por métodos ópticos alcanza unos 4000° C, y cuanto más alta sea, mayor es la cantidad de luz emitida.

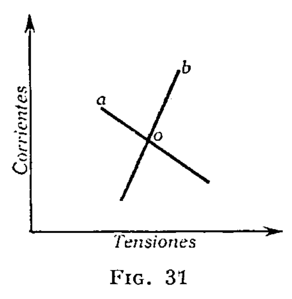


FIG. 31

Si la imagen de este arco se lleva a la rendija de un espectroscopio (es decir, un aparato capaz de separar las distintas radiaciones luminosas según su longitud de onda), se observa que su espectro o conjunto de las radiaciones emitidas es continuo para el cráter y electrodo negativo, mientras que para el vapor entre ambos está formado por finas líneas aisladas unas de otras. Si se colocan en el cráter compuestos metálicos de diversas substancias, tales como sales de calcio, estroncio, o bario y titanio, estas sales se vaporizan y emiten radiaciones de colores amarillo, rojo y blanco respectivamente; esta propiedad, aparte de otras causas de que hablaremos después, ha dado lugar a la fabricación de carbones con *mecha o núcleo*, obteniéndose los llamados carbones de *llama blanca* que llevan en su núcleo sales de bario, titanio y cerio. Cuando la corriente es demasiado grande, el cráter aumenta de tamaño y llega a superar el diámetro del carbón, y el arco comienza a oscilar en posición y silbar *(hiss)*. La potencia media consumida en carbones no especiales viene siendo de medio vatio por bujía.

Junto a estas características generales del arco de naturaleza óptica, que varían, según veremos, con la composición y forma de trabajar los carbones, hay otra eléctrica de no menor interés para la permanencia del arco: la característica *descendente corriente-tensión*, esto es, no sigue la ley de Ohm conocida en electricidad, o, como también se expresa, su *resistencia es negativa*, lo que vale tanto como decir que su resistencia disminuye a medida que aumenta la corriente que lo soporta; en efecto, si para una separación fija de carbones modificamos la tensión entre carbones y medimos la corriente que circula, observamos que la representación para pequeñas variaciones viene siendo una recta inclinada a la izquierda, tal como la representada en *a* en la figura 31 en lugar de tener la inclinación a la derecha como en *b*, que corresponde a las resistencias positivas ordinarias; por consiguiente, si aplicamos una tensión eléctrica constante, no se obtiene una permanencia en el arco, sino que, debido a la vaporización del carbón, la resistencia va disminuyendo y la corriente aumentando hasta que llega un momento en que la tensión aplicada no basta para mantener aquella corriente y el arco se apaga, lo que sucede en muy breves instantes. Para evitar esta falta de estabilidad se dispone en

serie con el arco una resistencia amortiguadora, que reduce la tensión aplicada a medida que aumenta la corriente; cuando ambas características, la del arco *a* y la de la resistencia amortiguadora *b*, se encuentran en el punto *o* se establece un estado de equilibrio y el arco no se interrumpe hasta que la distancia de los carbones, que aumenta como consecuencia de la vaporización, se hace excesivamente grande ([1]).

Como quiera que la luz emitida por el cráter, que es la que se utiliza para iluminar la película en proyección, depende de la temperatura que éste adquiere, conviene que ésta sea lo más elevada posible, para lo que deberá, de un lado, aumentarse la corriente y, por tanto, los carbones deberán ser de buena conductibilidad eléctrica; y, de otro lado, éstos deben tener una mala conductibilidad térmica a fin de que el calor originado en el cráter no se pierda por conducción a lo largo de la varilla de carbón positivo; es ésta la razón por la que muchos carbones se cubren con una capa metálica (carbones cobreados, etc.), especialmente los negativos que suelen ser de menor diámetro, y es por ello también que interesa mucho que haya un perfecto contacto eléctrico entre los carbones y portacarbones; pues así se facilita el paso de grandes corrientes y no se calientan los carbones más que en la punta activa.

Las densidades de corriente usuales en los arcos empleados en proyección oscilan entre 140 y 1000 A por 1″² (625 mm²) de sección.

Si en lugar de aplicar una tensión continua, como hemos supuesto hasta ahora, se aplica una tensión alternativa, el arco se produce también, pero puesto que en cada inversión de corriente hay un instante en que ésta pasa por el valor cero, hay una tendencia a su interrupción. La introducción de metales de tierras raras en el núcleo del carbón contrapesa esa tendencia, al mismo tiempo que da color y luminosidad a la corriente misma; no hay aquí propiamente una formación de cráter, puesto que cada carbón es alternativamente positivo y negativo y la temperatura en las puntas es más baja y su luz menos de la mitad de la del cráter de un arco con corriente continua y más amarilla para el mismo amperaje. Como no es posible enfocar ambas puntas, sólo se utiliza una de ellas, y el efecto combinado del cráter de luz en ese carbón y la luminiscencia del vapor producida por las substancias mezcladas en su parte adyacente, permite obtener una luz blanco-nieve de buena calidad. La figura 32 representa una foto de un arco en corriente alterna con los carbones muy separados para que se vea el efecto de la llama. Además, se produce un ruido característico de los arcos alimentados con corriente alterna, aunque éste se atenúa también por las substancias de su núcleo. Los carbones para estos arcos se denominan de *llama*, porque en realidad, como vemos, ésta tiene una marcada influencia en la luz utilizable.

([1]) Es falsa la afirmación respecto a la luz Beck que se hace en la página 105 de la obra de RUTERNBERG-STROEDECKE, *Manual del operador cinematográfico*, Barcelona, 1944, sobre la distinta naturaleza de la característica en arcos alta intensidad.

Ambos tipos de arcos se emplean en proyección de cine, pero mientras los arcos de corriente continua se emplean en pequeña y gran intensidad para toda clase de locales, los de corriente alterna sólo han tenido éxito en gran intensidad o cambiando su frecuencia (sistema Cycles de la marca Ashcraft), pues la frecuencia de la corriente se combina con el movimiento del obturador del crono, dando lugar a un centelleo en la pantalla *(flicker)* que hace el espectáculo poco confortable.

Fig. 32. Fotografía de arco en corriente alterna

Tipos de arcos. En definitiva existen dos clases de arcos: los de corriente continua, que son los más usados y conocidos en nuestro país, y los de corriente alterna, limitados a los sistemas Cycles y alta intensidad.

Tanto en corriente continua como en corriente alterna, los arcos se subdividen en *alta y baja intensidad*, aun cuando esta denominación no refleja exactamente la naturaleza del arco, puesto que el valor de aquélla no tiene una relación precisa con la forma de producirse la luz; los de baja intensidad se emplean en locales pequeños en que no se requiere un foco de gran brillo intrínseco, y son casi los únicos de uso en España debido a las circunstancias de la segunda guerra mundial, mientras que los otros se emplean en locales en los que por su tamaño grande, o condiciones de trabajo en los de tamaño intermedio, se requiere un foco de mayor brillo intrínseco y mayor volumen de luz.

Por último, modernamente se ha desarrollado el sistema Suprex o de *alta intensidad simplificada* que llena, con los de alta intensidad en corriente alterna, la laguna de los locales de tamaño intermedio con gran luz y reducido coste; de todos ellos nos vamos a ocupar sucesivamente, pero entiéndase bien que esta distinción se refiere más a la naturaleza y forma especial de trabajar los carbones que al valor de la intensidad de la corriente, como muchos creen.

Más interesante que esta clasificación es la que se puede hacer atendiendo a la naturaleza propia del arco y a su composición espectral; es decir, a éste y a su brillo intrínseco.

La versatibilidad del arco de carbón, tanto en la región visible del espectro como en la invisible, se debe a los tres tipos básicos de arcos:

a) Arcos de baja intensidad entre carbones sólidos o con mecha neutra.

b) Arcos de llama.

c) Arcos de alta intensidad.

a) Arco de baja intensidad. Es aquel en el que el foco principal de luz es el carbón sólido incandescente a o cerca de la temperatura de sublimación. En este tipo de arco se emplean carbones sólidos o de mecha neutra. La composición de la mecha neutra es predominantemente carbón, con un pequeño porcentaje de un material soporte del arco, tal como sales de potasio, que no contribuye materialmente a la producción de luz. Muchos de los arcos de baja intensidad trabajan en corriente continua, y el cráter del electrodo positivo origina una concentración de luz de la mayor blancura y brillo que es posible obtener de un foco sólido incandescente, alcanzando un brillo máximo de 175-180 bujías/mm², y una temperatura de color de 3550° K. Sin embargo, en comparación con la luz blanco-nieve que se puede obtener de otros focos, ésta tiene un ligero tinte amarillo. Su composición de color es aproximadamente: al 18 % de violeta y azul, el 32 % de verde y amarillo y el 50 % de anaranjado y rojo (fig. 33). Alguna luz se emite por la punta del carbón negativo y la corriente de arco, pero la cara del cráter del carbón positivo proporciona el 90 % de la luz del arco.

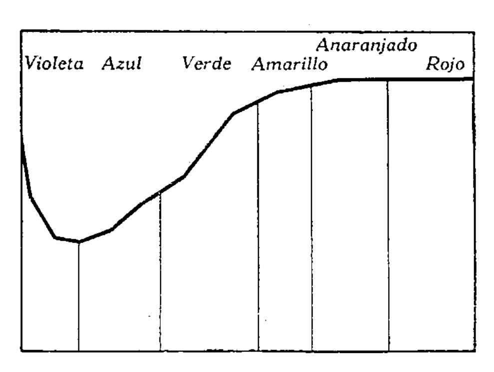


FIG. 33. Composición de color de la luz de un arco de carbón de baja intensidad

La densidad de corriente en el carbón positivo del arco en corriente continua varía de 7,75 a 31 A por cm² (50 a 200 A por 1″²) en los tipos usuales de lámparas. El área del cráter de ánodo se ajusta en sí mismo a la corriente de tal modo que se obtenga una temperatura próxima a la de sublimación del carbón. Por consiguiente, aumentando la corriente, aumenta el área del cráter, pero nunca se eleva la temperatura por encima de la de sublimación; podrá aumentarse la emisión total de luz del arco si el tamaño de carbón permite la formación de un cráter más grande al aumentar la corriente, pero nunca podrá pasarse de un brillo intrínseco de 175-180 bujías/mm². En aplicaciones tales como el cine sonoro donde hay limitaciones ópticas para el área del cráter que puede utilizarse, la máxima eficacia del foco se obtiene cuando se eleva el brillo de dicha área. Si se aumenta el área del cráter aumentando la corriente, el aumento en emisión total de luz se desperdicia, porque sólo una limitada área de aquel cráter cae dentro de las limitaciones ópticas del sistema de proyección.

La reacción entre el vapor del carbón en la corriente del arco y la atmósfera, produce una fuerte emisión de luz ultravioleta en la región de 3700 a 4000 Å. Esta punta de radiación es característica de todos los arcos de carbón, pero es menos prominente en los de bajo voltaje.

A altos voltajes excede ella con mucho en intensidad a la energía de las longitudes de onda en la región visible, como puede verse en la figura 34, para un arco a 140 V y 14 A, con un carbón con mecha neutra y otro sólido, y ambos de 12,7 mm de diámetro. Esta característica conduce al uso de arcos de carbón de alto voltaje y baja intensidad, cuando interesa esta banda ultravioleta. Es importante notar que el término *arco de baja intensidad* no implica baja emisión de energía radiante, sino que distingue un tipo básico de arco de otros tipos.

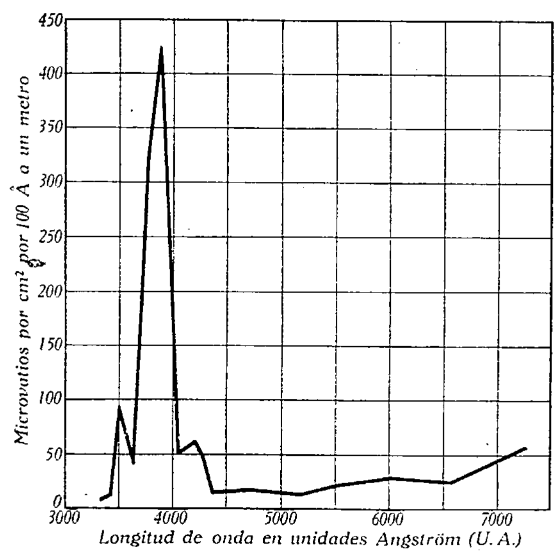


Fig. 34. Arco de baja intensidad: 14 A y 140 V

b) Arcos de llama. El más flexible de todos los arcos de carbón, respecto a la cualidad de radiación, lo constituye el arco de llama, ilustrado en la figura 32. El arco de llama es el desarrollo natural del arco de baja intensidad, obtenido ensanchando la mecha en los electrodos y reemplazando parte del carbón con compuestos químicos capaces de radiar eficazmente, cuando en forma gaseosa son fuertemente calentados. Estos compuestos se vaporizan con el carbón y se difunden a través de la llama del arco haciéndola luminiscente. La gran concentración de materiales de llama en la mecha reduce el área y brillo de la mancha de ánodo, de modo que, a las bajas densidades de corriente empleadas en los arcos de llama, la contribución del electrodo incandescente a la totalidad de la luz es poco importante. La evaporación de los materiales de llama es lenta, en relación a la obtenida en arcos de alta intensidad, y la concentración resultante de los elementos de llama en la corriente del arco es baja, de modo que no se obtiene un gran brillo. En el arco de llama amarilla este brillo es de 8 bujías por milímetro cuadrado; como la totalidad de la llama se hace luminosa, el foco de luz es de gran área y la eficacia luminosa grande.

La radiación emitida por el arco de llama consiste principalmente en el espectro característico de líneas del material de llama, y del espectro de bandas de los compuestos formados. Como materiales de llama se emplean metales de tierras raras del grupo del cerio, cuando se desea una luz blanca, mientras que las sales de calcio dan una luz

amarilla, y las de estroncio dan un tinte rojizo. Otros compuestos metálicos se usan para reforzar bandas específicas del ultravioleta. Las gráficas de las figuras 35, 36 y 37 muestran la distribución espectral característica de la radiación de carbones con núcleo o mecha de cerio, estroncio y núcleo polimetálico. Los carbones con núcleo de cerio, llamados carbones *Sunshine* (brillo de sol), son los que producen una composición de radiación más parecida a la luz solar de entre los empleados en usos industriales, y tienen interés cuando se quiere duplicar la cualidad de color de la luz solar o reproducir los efectos fotoquímicos de las radiaciones visible y ultravioleta de la luz del sol; tal es el caso, por ejemplo, en fotografía, y la figura 38 da una imagen comparativa de la distribución espectral de la luz del sol al nivel del mar, con la obtenida con carbones de los usados en estudios de cine para alumbrado de *exteriores*.

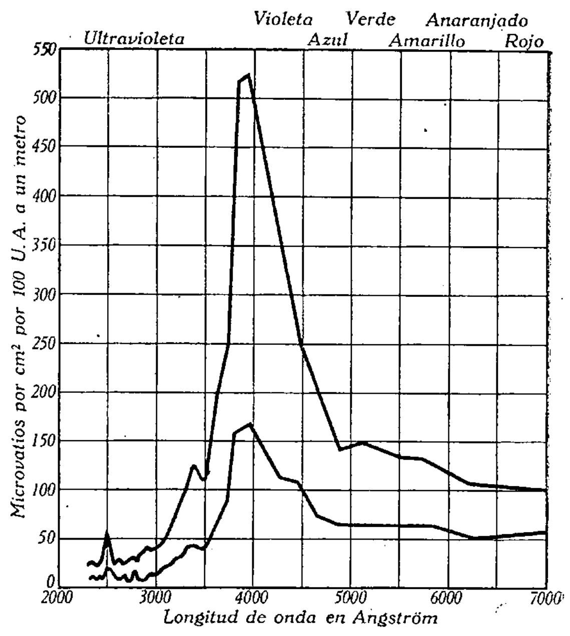


FIG. 35. Arco con mecha de cerio a 30 y 60 A, 50 V en c. a.

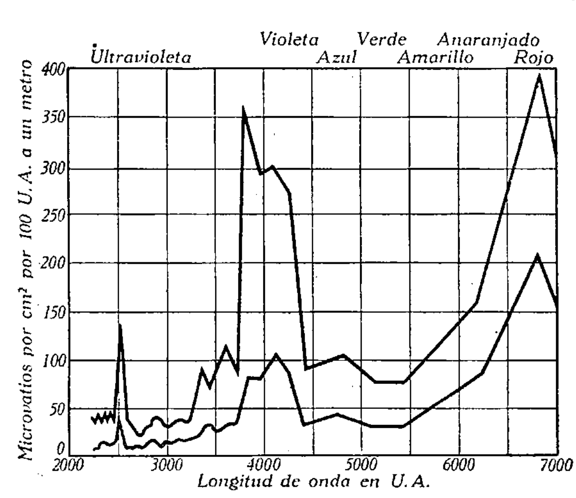


FIG. 36. Arco con mecha de estroncio a 30, 60 A y 50 V c. a.

c) Arcos de alta intensidad. El arco de alta intensidad es aquel en el que en adición a la luz de la superficie incandescente del cráter, se agrega una gran cantidad

de luz, originada en la región gaseosa inmediatamente frente al cráter, como resultado de la combinación de la gran densidad de corriente y una atmósfera rica en materiales de llama.

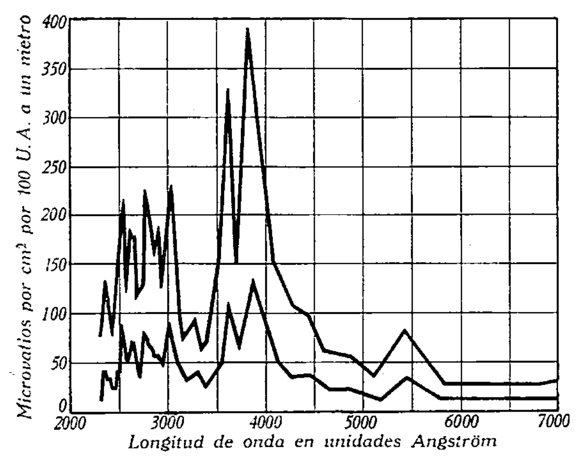


Fig. 37. Arco con mecha polimetálica a 30, 60 A y 50 V en c. a.

Para producir un arco en corriente continua de alta intensidad, el carbón positivo debe tener un núcleo con compuestos químicos similares a los empleados en los arcos de llama; la densidad de corriente es mucho más alta, de modo que la mancha brillante del ánodo se extiende sobre la punta entera del carbón, resultando una rápida evaporación de los materiales de llama, así como del carbón de la mecha. Como los materiales de llama son

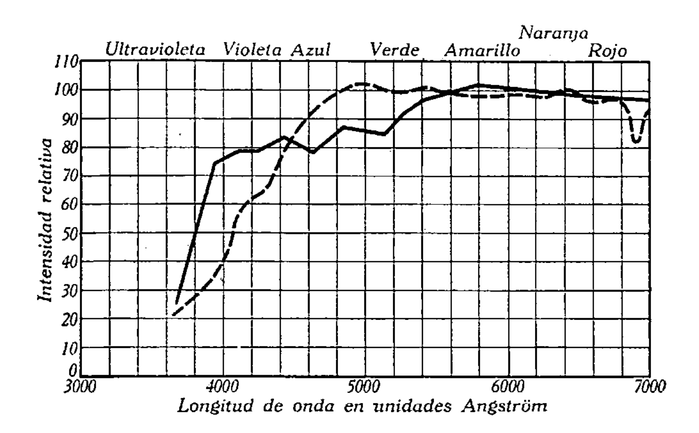


Fig. 38. Distribución de energía de radiación solar al nivel del mar (datos Parry Moon). Radiación de un arco de estudio 40 amp. 37 voltios. Las ordenadas son proporcionales, para dar igual intensidad aprox. en la punta de la curva de visibilidad

más fácilmente ionizados que el carbón, su presencia en la capa superficial del ánodo origina un descenso en el núcleo o mecha con relación a su camisa de carbón. Esto tiende a concentrar la corriente en la superficie del núcleo, resultando un mayor ahuecamiento del

cráter, cuando aumenta la corriente. La evaporación rápida de los materiales de llama produce una alta concentración de este gas tan eficaz en la radiación, tanto en el cráter como frente a él. Hay una estrecha correlación entre el brillo del gas, dentro y en frente del cráter, y la profundidad del cráter, y para un tipo dado de carbón positivo, hay una relación lineal entre esa profundidad y el exceso de brillo sobre el de un arco de baja intensidad.

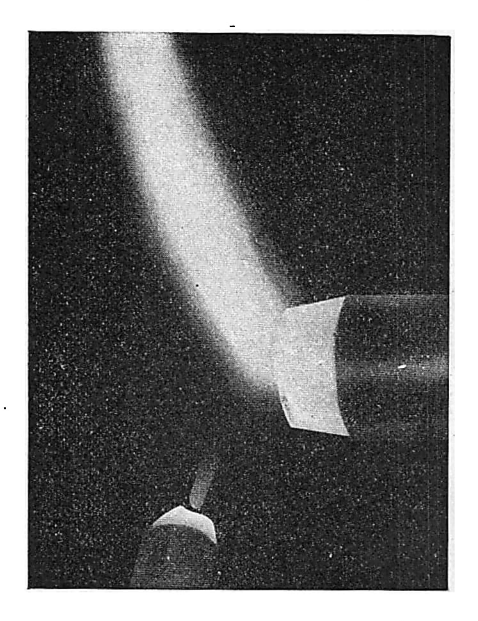


Fig. 39. Arco de alta intensidad corriente continua con colector refractivo y positivo rotatorio

El incremento de brillo de un arco de alta intensidad, sobre uno de baja, se produce por la radiación de la *alta concentración* de los materiales de llama en los confines del cráter. Un aumento en la corriente en un arco de alta intensidad, produce un muy ligero aumento en el área del cráter, pero un marcado incremento en su brillo. El brillo máximo del cráter obtenido en varios tipos de arcos industriales de alta intensidad oscila entre 350 y 1200 bujías por milímetro cuadrado con densidades de corriente en el carbón positivo de 62 a 186 A por cm^2 (400 a 1000 A por cm^2 $1''^2$). Con carbones experimentales se ha llegado a producir brillos por $1''^2$ de 2000 bujías por mm^2, superior al brillo del sol.

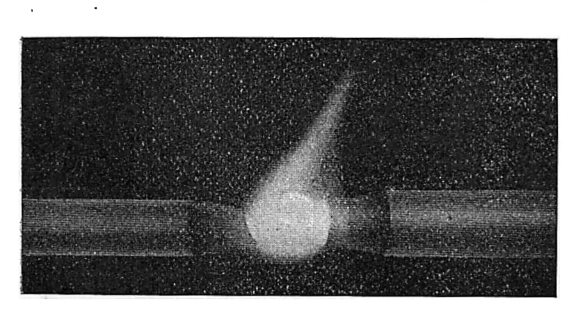


Fig. 40. Arco Suprex con campo magnético suplementario y el eje del negativo ligeramente más bajo

Los tipos originales de carbones para arcos de alta intensidad y los tipos actuales, utilizan carbones de 9 mm o más de diámetro, con el carbón negativo inclinado respecto al positivo, y este último girando durante el funcionamiento para mantener un cráter simétrico de forma tal como se ve en la figura 39. Los últimos desarrollos permiten el uso de carbones montados horizontalmente, pero con el eje del ne-

gativo ligeramente más bajo que el positivo (fig. 40). Empleando carbones cobreados en esta posición, de relativamente pequeño diámetro, es posible mantener una forma correcta del cráter sin rotación del positivo. Estos arcos se llaman de *alta intensidad simplificada* y emplean como máximo diámetro 8 mm en el positivo y 1 mm menos en el negativo. El arco de alta intensidad puede producirse también con corriente alterna y constituye un arco de tal tipo, dentro de la definición que hemos dado de aquéllos. Los carbones son de igual diámetro y ambos llevan materiales de llama en su núcleo. Una gran densidad de corriente y una alta concentración de materiales de llama se combinan para producir luz en ambas puntas incandescentes de los electrodos y en las regiones inmediatamente adyacentes, al igual que en los de corriente continua de alta intensidad. El arco en corriente alterna de alta intensidad trabaja con los carbones más próximos y con más bajo voltaje que el de corriente continua de la misma corriente. En las condiciones correctas de trabajo hay un área fuertemente luminosa adyacente a cada cara del electrodo, y las colas de llama de ambos electrodos emergen juntas en una bola luminosa de poco brillo con dos puntas bien definidas en su parte superior (fig. 41). Con este arco se obtiene un brillo intrínseco de 280 bujías/mm².

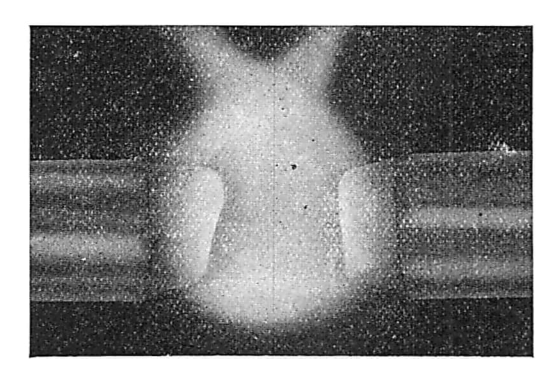


FIG. 41. Arco de alta intensidad en corriente alterna

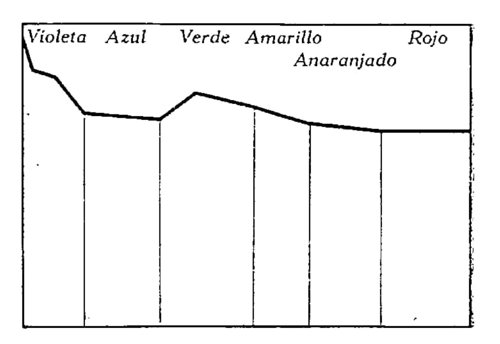


FIG. 42. Composición de color de la luz de un arco de carbón de alta intensidad para proyector

Excepto en algunos carbones de alta intensidad, usados en terapéutica, los núcleos de todos los carbones de alta intensidad contienen compuestos del grupo del cerio, semejantes a los empleados en el arco de llama blanca. Estos carbones producen una luz blanco de nieve, con una temperatura de color próxima a los 5800° K y, aproximadamente, la misma emisión de energía en las bandas violeta-azul, verde-amarillo y rojo-naranja del espectro. La figura 42 da la composición

de color de estos arcos empleados en proyección en cine. Su principal uso es en proyección de películas, en que se necesita un foco de luz de brillo muy elevado para lograr el necesario volumen de luz en un área limitada del foco, en razón a la naturaleza del sistema óptico relativamente pequeño. Por otra parte, el cráter del carbón positivo es suficientemente plano y con una distribución de luz bastante uniforme para poder ser recogida la luz y dirigida convenientemente mediante un solo y sencillo reflector, o colector de luz.

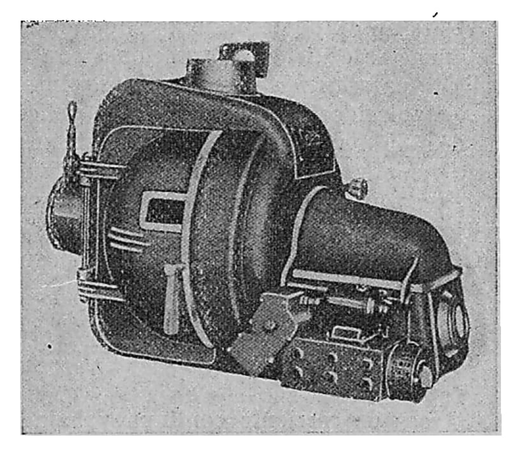


Fig. 43. Linterna Cyclex alta intensidad simplificada de 1 kw

Según hemos dicho, aproximadamente el 50% de la luz del arco de baja intensidad está en la parte anaranjada y roja del espectro, lo que produce un reforzamiento de esos colores en las películas en color. Las películas en color deben proyectarse con focos que tengan aproximadamente igual intensidad para los tres colores primarios, condición a la que satisfacen muy completamente los arcos de alta intensidad. Es ello lo que ha permitido y generalizado el empleo de las lámparas llamadas de *un kilovatio*, que consumen poco más de este valor y, casi al mismo precio que los arcos de baja intensidad; dan a los teatros la oportunidad de excelentes proyecciones (fig. 43). Digamos, por último, algo en relación con la película de 16 mm; su generalización y proyección ante grupos cada vez más amplios crea la necesidad de más luz y ha conducido a la adaptación del arco de alta intensidad a este tipo de película. Puesto que muchas películas en color, de 16 mm, se producen con un colorido rojizo relativamente débil, debido a la proyección usual con lámpara incandescente, la luz blanco-nieve característica de los arcos de alta intensidad no da una buena reproducción. Se han diseñado carbones especiales de alta

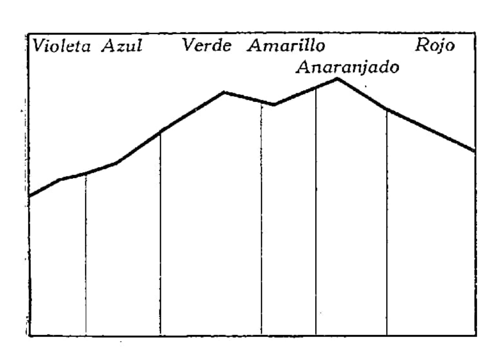


Fig. 44. Composición de luz de un arco de carbón de alta intensidad para proyector de 16 mm

intensidad para 16 mm que producen una luz con menos azul y más rojo, de tal modo que la luz del foco tiene una temperatura de color de 4450° K, obteniéndose así una reproducción natural de los colores en la pantalla. La comparación de las figuras 44 y 42 muestran la extensión en que se modifica la composición de la luz.

Para un grupo de personas superior a 400 y una pantalla de 3,60 m de ancho se obtienen proyecciones con un brillo excelente en la pantalla, y para grupos más grandes se obtienen brillos dentro de los límites establecidos para tal ancho de película con imágenes en pantalla de 4,85 mm de anchura. Los carbones *Pearlex* para estos arcos son de 6 mm el positivo y 5,5 mm el negativo y ambos con mecha.

Como quiera que en España son muy poco conocidas las características esenciales de los distintos tipos de arcos, vamos a ocuparnos en detalle de cada uno de ellos, indicando sus condiciones de ajuste y trabajo.

Arcos en corriente continua

Arcos de corriente continua y baja intensidad. El estudio de la influencia de la corriente en la formación del cráter, se logra con el

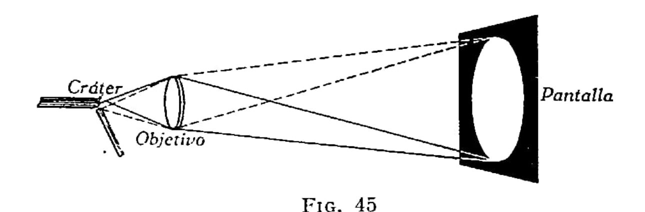
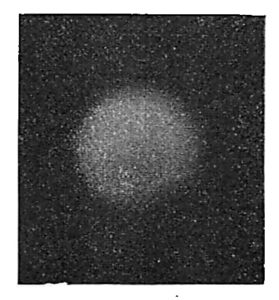
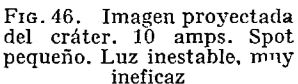


Fig. 45




Fig. 46. Imagen proyectada del cráter. 10 amps. Spot pequeño. Luz inestable, muy ineficaz

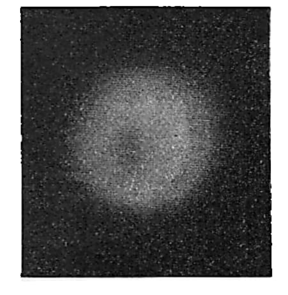


Fig. 47. 12 amps. Spot algo más grande. Luz todavía inestable, muy ineficaz

sistema de la figura 45, en la que se da un aumento de 30/1 a la imagen del cráter en la pantalla; se emplean carbones National de 10 mm con

mecha para el positivo y de 7 mm y sólido para el negativo, formando un ángulo de 75°; estos carbones permiten trabajar en buenas condi-

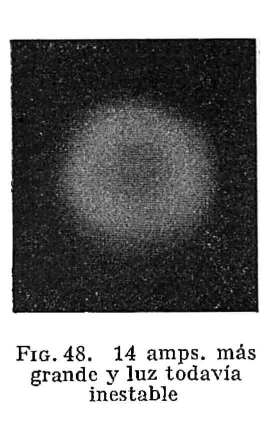


FIG. 48. 14 amps. más grande y luz todavía inestable

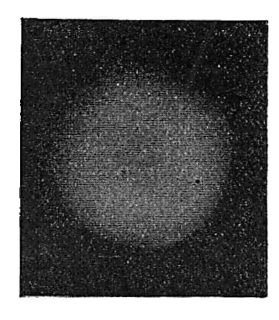


FIG. 49. 16 amps. Spot todavía más grande. Límite inferior para carbones de 10 mm

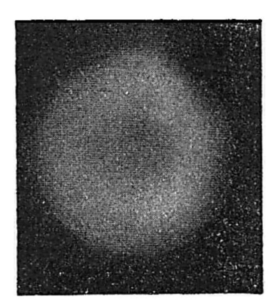


FIG. 50. 18 amps. Arco bueno. Casi la máxima eficacia

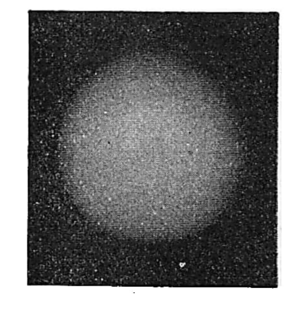


FIG. 51. 20 amps. Arco estable y permanente. Máxima eficacia

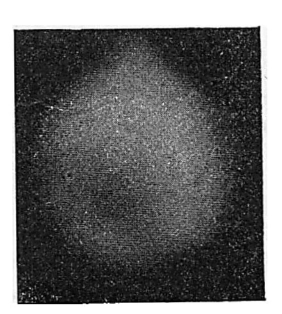


FIG. 52. 22 amps. Arco comienza a ser inestable. Carbones sobrecargados

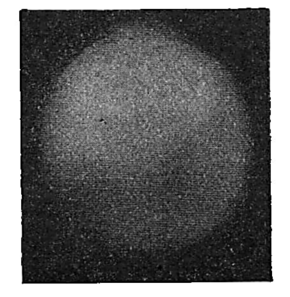


FIG. 53. 24 amps. Arco aún más inestable. Muy ineficaz y frecuentes silbidos

ciones entre 18 y 20 A, pero para observar lo que sucede se ha comenzado con 10 A hasta 24 A con saltos de 2 A. Las fotografías 46 a 53

muestran la evolución con la corriente, y son muy instructivas porque demuestran el interés que tiene el seguir escrupulosamente los consejos del fabricante en cuanto al amperaje de trabajo, para la obtención de una luminosidad y estabilidad perfecta.

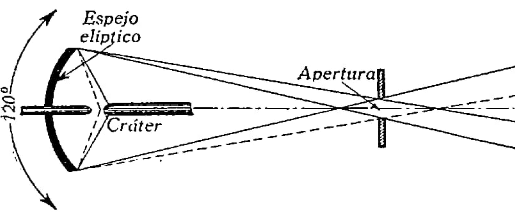


Fig. 54

A 10 A la luz se mueve en la punta del carbón positivo, lo que es debido a que la punta es demasiado grande para la corriente que deja pasar, por lo que el arco resulta inestable y difícil de ajustar. A medida que aumenta la corriente se hace más estable y el cráter aumenta de tamaño; de 18 a 20 A, el círculo brillante blanco del cráter se hace lo más grande posible, con completa estabilidad, y los carbones se queman de un modo estable y permanente para esta combinación de carbones. Si se pasa de los 20 A hay tendencia a la inestabilidad, debido a la sobrecarga de esta combinación y, además, el cráter es menos brillante. En definitiva, *para cada combinación de diámetros y tipo de carbones, se obtiene la máxima eficacia precisamente debajo de la máxima corriente tolerable de los carbones* sin sobrecarga; es decir, en nuestro caso, entre 18 y 20 A.

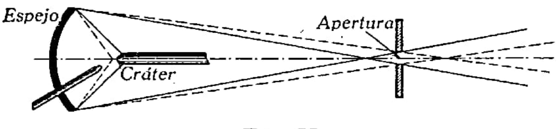


Fig. 55



Fig. 56. Negativo demasiado alto

Si para economizar carbones el operador los quema de mayor diámetro, las condiciones de emisión de luz empeoran para el mismo consumo, y si se sitúa en el régimen de trabajo de los nuevos carbones, otra vez aumenta el gasto.

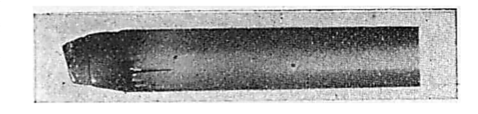


Fig. 57. Negativo demasiado bajo

Las densidades de corriente en estos carbones son del orden de 120 a 165 A por 1″² en el carbón positivo, pero con los SRA de que después hablaremos, que han reemplazado casi totalmente a éstos en baja intensidad, se llega a los 205 A por 1″², y en alta intensidad se llega desde los 500 hasta más de 800 A.

En los arcos antiguos, los carbones estaban inclinados 20° con el positivo arriba, o bien 15° el superior y 10° el inferior, para que la mayor cantidad de luz del cráter incidiese sobre el condensador. El

positivo lleva la mecha y el negativo, de menor diámetro (Silvertip y Orotip National), lleva la cubierta metálica sin y con mecha respectivamente.

Dado el uso casi nulo de estos arcos en España y teniendo en cuenta el más generalizado de los de colector reflector y arco horizon-



FIG. 58. Exceso de corriente

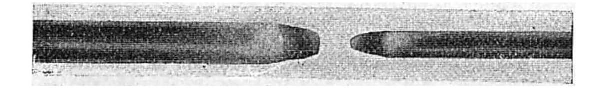


FIG. 59. Trabajo y corriente correctos

tal (figs. 54 y 55), a estos tipos nos vamos a referir casi exclusivamente. Como se ve en las figuras, el positivo es horizontal y el negativo horizontal o inclinado 75°. El cráter del positivo debe estar lo más vertical posible, lo que se consigue colocando el negativo ligeramente más bajo que el positivo; además, el cráter debe ser ligeramente en forma de copa. Si el carbón negativo está demasiado alto, se produce un labio en la parte inferior del positivo y el cráter se inclina, perdiéndose luz en el colector (fig. 56); si está demasiado bajo, sucede lo contrario y el cráter se inclina en dirección opuesta (fig. 57); si trabajan a mayor corriente de la específica de cada combinación, se queman en la forma de la figura 58 en lugar de la correcta de la figura 59; esa forma se produce también cuando los carbones se sujetan demasiado lejos de las puntas, lo que produce un exceso de calor por conducción en los carbones, o bien cuando el contacto en los portacarbones no es bueno. Por último, si los carbones están demasiado cerca, se produce en el negativo un botón como el de la figura 60, que quita gran cantidad de luz. En todo caso, los carbones deben estar perfectamente secos, pues de otra manera, el arco *escupe* el vapor de agua absorbido, con perjuicio del espejo. Una buena práctica es tener siempre una pareja de repuesto encima de un reóstato que desprenda calor o en la misma linterna. Todos estos arcos trabajan entre 10 y 40 A. A continuación damos las combinaciones usuales de los tipo *National.*

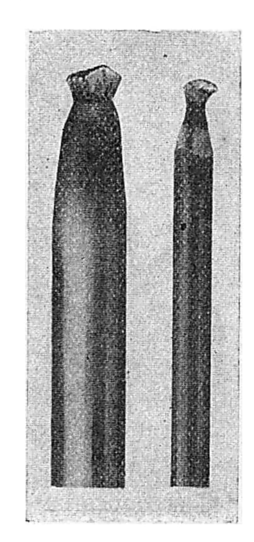


FIG. 60. Carbones demasiado próximos

Arco horizontal			⌀ × longitud, tamaño y class	
Amperios en arco	Voltios aproximados en arco	Polaridad	Con mecha	Sin mecha o sólido
10-15	54-57	Positivo	9 mm × 8″	—
		Negativo	—	6,4 mm × 8″
16-20	54-57	Positivo	10 mm × 8″	—
		Negativo	—	7 mm × 8″
21-25	54-57	Positivo	12 mm × 8″	—
		Negativo	8 mm × 8″	o bien 8 mm × 8″
26-30	54-57	Positivo	13 mm × 8″	—
		Negativo	9 mm × 8″	—
31-35	54-57	Positivo	14 mm × 8″	—
		Negativo	10 mm × 8″	—
Arco horizontal angular				
6-10		Positivo	9 mm × 8″	
		Negativo	8 mm × 8″	
11-15		Positivo	10 mm × 8″	
		Negativo	9 mm × 8″	
16-20		Positivo	12 mm × 8″	
		Negativo	10 mm × 8″	

Además de mantener las condiciones de trabajo escrupulosamente, según las indicaciones del fabricante, se necesita que el cráter del positivo se encuentre en el punto focal correspondiente al colector, para que la iluminación sea buena en todo instante; para ello, todas las lámparas modernas llevan un sistema de engranajes con motor que permite ajustar el movimiento del carbón negativo necesario para compensar su desgaste respecto al del positivo manteniendo la separación uniforme entre ambos al valor deseado y de modo que la posición del cráter con relación al colector no se altere.

La influencia en la iluminación de estos factores y de la corriente, lo vamos a ver con detalle en un caso particular con los carbones SRA National.

Estudio de las condiciones de trabajo con carbones de baja intensidad y gran carga. Las exigencias crecientes, aun en teatros pequeños, de focos más potentes para la proyección —debido al uso de pantallas perforadas, que como veremos al ocuparnos de las mismas ocasionan una pérdida de luz, pero que son en cierto modo indispensables si se quiere que el sonido se reproduzca fielmente— así como la extensión cada vez mayor que va adquiriendo el cine en color y, por último, la necesidad de un nivel de iluminación más elevado en la pantalla para hacer resaltar todo el contraste que las modernas películas en blanco y negro presentan a lo largo de los distintos matices de ennegrecimiento correlativo de una mayor iluminación en la impresión de pelí-

culas, condujo a la creación de nuevos carbones que pudieran superar las limitaciones que respecto a la corriente tienen los carbones utilizados en arcos de corriente continua a baja intensidad, los cuales presentan un mayor brillo intrínseco; el prototipo de dichos carbones son los americanos SRA, con mecha, cuyos tamaños y rangos de corriente indicamos a continuación:

De 28 a 32 amperios { Positivo 12 mm por 8″ SRA con mecha neutra. Negativo 8 mm por 8″ SRA con mecha neutra.

De 32 a 42 amperios { Positivo 13 mm por 8″ SRA con mecha neutra. Negativo 8 mm por 8″ SRA con mecha neutra.

Estos carbones deben usarse siempre combinados en esta forma y bajo los regímenes de carga que se indican, so pena de perder calidad, como ya hemos visto, en el foco. Igual que antes, es preferible hacer trabajar los carbones cerca de su tope superior de consumo, y en razón de seguridad se han tomado dos amperios por debajo del tope superior como las mejores condiciones de trabajo. Para estos carbones, como antes, lo que interesa es la luz del cráter positivo, ya que en ellos el negativo sólo contribuye con un 10 % en la luz total y el diámetro de éste crece con el incremento de corriente.

La tabla siguiente da las posibilidades de consumo para cada diámetro:

Diámetro del carbón positivo	Mínima corriente recomendable	Máxima corriente recomendable	Corriente en amperios por encima de la que el arco escupe o chisporrotea
10 mm	21 A	24 A	25 A
12 mm	28 A	32 A	34 A
13 mm	32 A	42 A	44 A
14 mm	42 A	52 A	55 A

Pero debe tenerse en cuenta que si los carbones se queman a ese máximo de corriente, el foco se hace inestable sin ventaja de potencia en bujías sobre la pantalla, y si se queman por debajo del mínimo, decrece la eficacia en producción de luz, y, como ya sabemos, el arco se hace inestable porque el área del cráter se hace demasiado pequeña para cubrir el extremo del cráter.

El incremento del diámetro del cráter positivo con la corriente se ve en la tabla de la página siguiente, con cuyos datos se ha construído la figura 61:

Cambio en el diámetro de cráter con la corriente en carbones SRA positivos

Diámetro del carbón en mm	Corriente Amperios	Diámetro cráter en pulgadas	Área del cráter	
			Pulgadas cuadradas	Milímetros cuadrados
10	21	0,262	0,0539	34,8
10	24	0,278	0,0607	39,2
12	28	0,311	0,0760	49,0
12	31	0,325	0,0830	53,5
12	34	0,344	0,0929	60,0
13	34	0,347	0,0946	61,0
13	40	0,378	0,1122	72,4
13	44	0,392	0,1207	77,9
14	44	0,404	0,1282	82,7
14	50	0,419	0,1379	89,0
14	55	0,432	0,1466	94,6

La acción de la corriente continua calienta el cráter positivo a una temperatura de 4000° Kelvin aproximadamente, que es la temperatura de vaporización del carbón, y para la cual tiene un brillo intrínseco de 130 a 175 bújías/mm², sólo superado por el cráter de un carbón de alta intensidad.

Según se ve en la figura 61, el brillo intrínseco es uniforme en toda el área de la mecha, crece abruptamente a un máximo en la cubierta de la mecha, justamente en su parte interna, y decrece cerca del borde del cráter. Si el carbón fuera sólido, en lugar de con mecha, no habría el decrecimiento de brillo intrínseco en el centro del cráter, pero esta mecha es necesaria a fin de proporcionar al carbón materiales que soporten el arco y para mantener fijo el cráter con relación al carbón en posición. De otro modo, la corriente sería fuertemente reducida y el cráter se movería en la punta del carbón, resultando una luz muy inestable en la pantalla.

Se observa que por encima de una cierta corriente, para cada tamaño de carbón, no hay prácticamente incremento de brillo intrínseco en el centro del cráter; únicamente aumenta el diámetro del cráter y el brillo intrínseco en los bordes del mismo. Es también notable el hecho de que, después de haber alcanzado esa corriente crítica (24 A para los de 10 mm y 44 A para los de 13 mm), el brillo intrínseco 160 bujías/mm², es el mismo en la parte central del cráter para ambas clases de carbones; esta característica tiene mucha importancia, como hemos de ver después, en relación con los sistemas ópticos. Obsérvese también que la corriente aproximada, para la cual la porción central del cráter se acerca a su máximo brillo intrínseco, es el valor mínimo de corriente recomendado en la tabla que dimos antes para ese diámetro de carbón; un descenso en el amperaje disminuye rapidamente el brillo intrínseco. La distribución tiene verdadera importancia para la proyección angular alrededor del cráter de la luz expresada en bu-

jías; este diagrama polar de la potencia en bujías para dos corrientes se muestra en la figura 62; para otras corrientes y diámetros de carbones, las curvas son de forma semejante y los valores de potencia en bujías proporcionales. Como estas curvas no expresan propiamente esa poten-

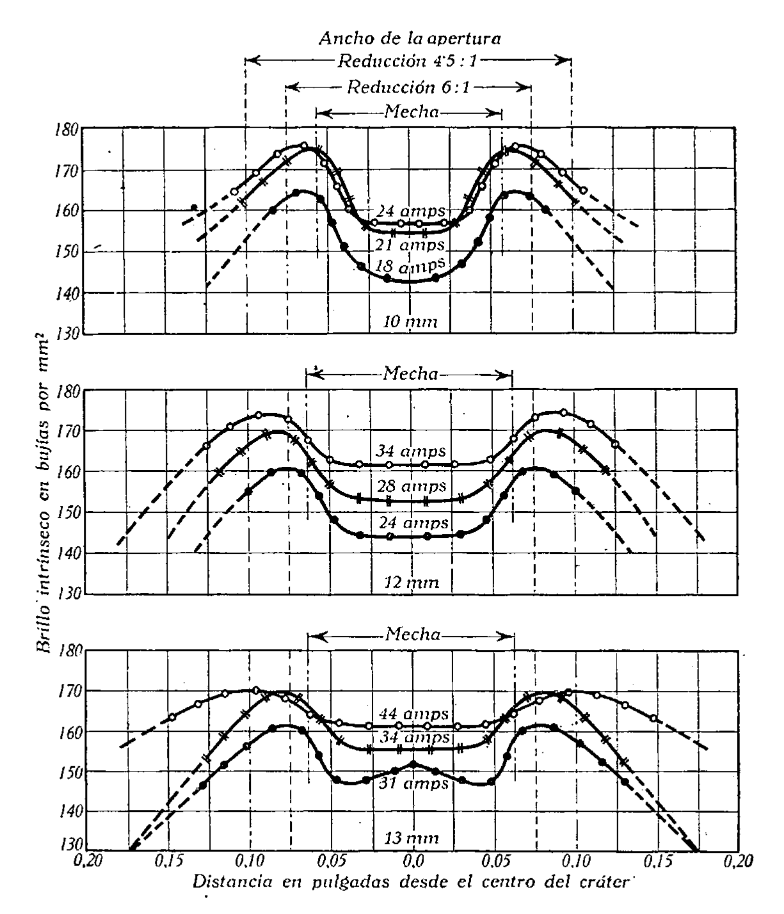


Fig. 61. Brillo intrínseco de carbones positivos a través de la cara del cráter

cia en bujías, sino dentro del volumen que encierran haciéndolas girar sobre el eje que pasa por el carbón, un sistema equivalente de expresar la misma cosa es computar la cantidad de luz en cada zona angular; tales valores se encuentran en las tablas que se dan en la página 70.

Los sistemas colectores empleados con esta clase de carbones son los usuales en arcos de baja intensidad, es decir reflectores elípticos o parabólicos con condensador. Independientemente del sistema empleado, según veremos, la luz recogida del arco suele ser la compren-

Distribución angular de luz en carbones positivos SRA
De 12 mm a 30 A

Ángulo	Bujías-potencia media	Flujo en lúmenes en varias zonas	Porcentaje del total de lúmenes	Porcentaje acumulativo del total de lúmenes
0-10	8,695	825	3	3
10-20	8,360	2,360	9	12
20-30	7,590	3,520	13	25
30-40	6,670	4,180	16	41
40-50	5,730	4,430	17	58
50-60	4,730	4,230	16	74
60-70	3,600	3,570	14	88
70-80	2,220	2,260	9	97
80-90	720	780	3	100
		26,155 (Total)		
De 14 mm a 47 A				
0-10	13,950	1,320	3	3
10-20	13,100	3,700	9	12
20-30	12,200	5,600	14	26
30-40	11,350	7,130	17	43
40-50	9,650	7,460	18	61
50-60	7,630	6,850	16	77
60-70	5,340	5,300	13	90
70-80	2,930	3,100	7	97
80-90	1,015	1,110	3	100
		41,570 (Total)		

dida en un ángulo de 120°, y de acuerdo con la tabla representa el 75 % de la luz procedente del cráter positivo, del cual da el colector una imagen sobre la apertura de proyección (prescindiendo, naturalmente, de las aberraciones) con un aumento de 6/1. En estas condiciones es *teóricamente* correcto que el máximo volumen de luz se obtendrá en la pantalla con carbones de 10 mm para una corriente de 21 A, y que corrientes más altas dan más luz solamente en aquellas partes de la apertura marginales, en las que es absorbida o reflejada, lo que puede verse más fácilmente en la figura 61. En esta figura, en lugar de proyectar el cráter en la apertura, se ha reducido el ancho de la apertura en la relación $^1/_6$ ó $^1/_{4,5}$ (que son los aumentos usuales de los sistemas colectores, según veremos después al ocuparnos de éstos) y superpuesto a las dimensiones del cráter. Esto equivale a efectuar la marcha inversa de los rayos de luz en el colector, para ver las dimensiones cubiertas en el cráter.

Los valores del brillo intrínseco para las partes del cráter dentro del ancho de la apertura nos muestran que no puede esperarse más luz dentro de la apertura con carbones de 13 mm a 14 A que con carbones de 10 mm a 21 A; también se observa que si los carbones trabajan por debajo de su mínimo, por ejemplo carbones de 13 mm a 31 A, o

de 12 mm a 24 A, habrá menos luz a través de la apertura debido a que disminuye el brillo intrínseco de la parte central del cráter.

A pesar de ello, hay razones para no emplear, para la proyección ordinaria de los cines, el tamaño de carbón más pequeño, o las corrientes más bajas, teóricamente posibles: la luz total y la uniformidad de iluminación en la pantalla depende ampliamente de la posición del cráter positivo con relación al punto focal del espejo (véase colectores de luz y teoría de espejos). En la práctica es muy difícil mantener el cráter positivo dentro de una distancia de 0,025″ (0,635 mm) del punto focal del reflector, que es la precisión necesaria para obtener la máxima luz en la pantalla con carbones de 10 mm a 21 A en los colectores de espejo de que antes hemos hablado como más corrientes; los carbones de 12 mm tienen, en cambio, suficiente amplitud de posición para enfocar con facilidad, y es, por consiguiente, este tamaño el más pequeño en uso. Los cambios de luz sobre la pantalla, originados por el movimiento del cráter positivo a lo largo del eje del reflector, para distintas corrientes y tamaños de carbones, se muestran en la figura 64, y en la tabla que damos a continuación:

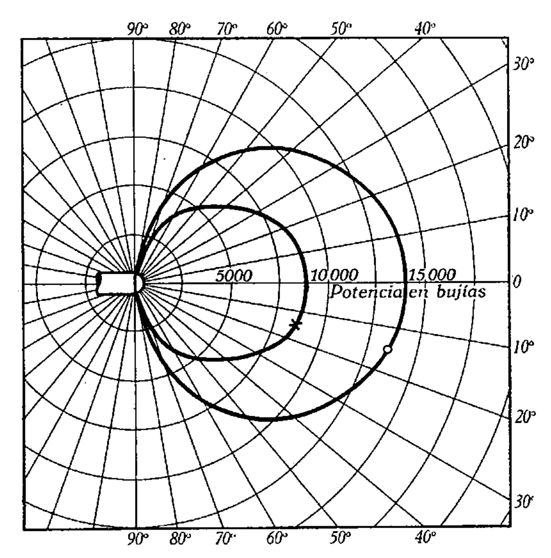


FIG. 62. Carbones positivos SRA. Distribución de potencia en bujías

Diámetro carbón	Corriente	Movimiento tolerable total a lo largo del eje, para un cambio inferior al 5% de la iluminación de la pantalla
10	21	0,06″ = 1,52 mm
10	24	0,10″ = 2,54 »
12	28	0,10″ = 2,54 »
12	34	0,15″ = 3,81 »
13	34	0,11″ = 2,79 »
13	45	0,21″ = 5,33 »
14	45	0,18″ = 4,57 »
14	55	0,34″ = 8,64 »

De aquí resulta que el uso de carbones de 13 mm a 40 A aparece plenamente justificado para garantizar una uniformidad de la ilumi-

nación en la pantalla. Igualmente con este carbón y corriente, el cráter positivo debe mantenerse a menos de 0,07″ (1,8 mm) del punto focal del reflector para mantener la iluminación de la pantalla dentro del 5% del máximo posible.

El movimiento tolerable del cráter positivo a lo largo del eje para varios tamaños y corrientes de carbones sin disminución apreciable de luz en la pantalla, puede determinarse a partir de las figuras 61 y 63,

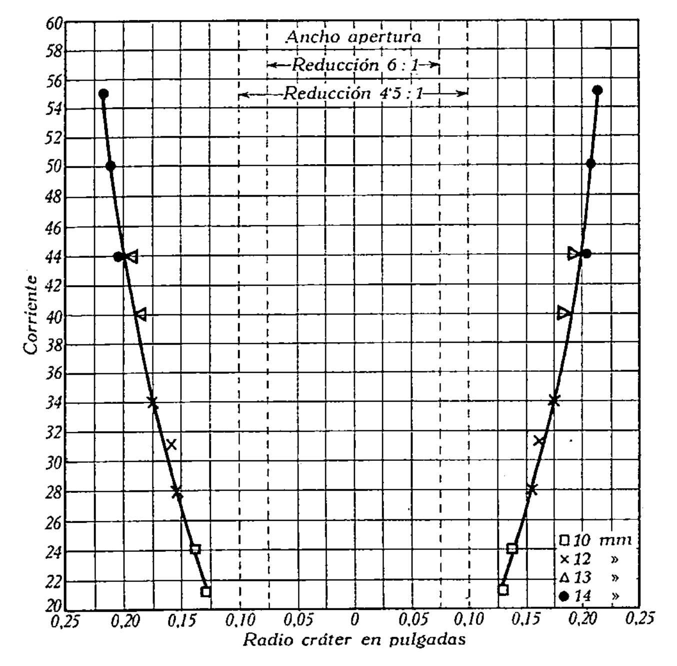


Fig. 63. SRA Carbones positivos. Aumento de cráter con la corriente. Relación entre diámetro del cráter y ancho apertura

donde puede compararse el ancho de la apertura para un aumento lateral de 6/1 con el diámetro del cráter y el brillo intrínseco; estos datos demuestran que es preferible usar un carbón, a o muy cerca de su máxima capacidad de corriente, que el tamaño siguiente más grande de carbón, a o muy cerca de su mínima capacidad de corriente, y muestra también que un carbón de 13 mm da amplia latitud para trabajar con los colectores usados corrientemente, sin necesidad de emplear carbones de mayor diámetro.

En el estudio de los colectores y de los carbones de baja intensidad se verá y se vió, respectivamente, cuáles son las limitaciones de tales colectores, especialmente en cuanto a su ángulo de abertura. Los objetivos de proyección más rápidos dejan pasar un cono de luz de aproximadamente 20° en su diámetro angular; esto fija prácticamente la relación de su aumento en 6/1 y su ángulo de abertura, visto desde

el cráter, en 120°. Si se aumenta su ángulo de abertura para tomar más luz del cráter, o si se reduce el aumento, no se obtendrá ventaja, porque en ambos casos el ángulo de divergencia más allá de la apertura habría aumentado; pero el objetivo de proyección sólo deja pasar la parte correspondiente más pequeña a aquel ángulo de los 120° en el reflector y los 20° del objetivo; se necesita, pues, objetivos más rápidos. Esto se ha logrado recientemente con conos de luz, en tales objetivos, de hasta más de 29°; tales objetivos permiten reducir el aumento al valor 4,5/1, recogiendo toda la luz que toma el colector con un ángulo de 120° alrededor del cráter (o bien, como en el espejo Bausch & Lomb empleado en las linternas Ashcraft, conservando el aumento, pero aumentando el ángulo a 140°). Este cambio únicamente requiere un nuevo reflector del aumento adecuado (un diámetro ligeramente superior y algo más alejado del cráter para dejar espacio suficiente delante de la lámpara), el nuevo objetivo y los carbones y corriente adecuados. La luz sobre la pantalla aumentará teóricamente (véase abertura de los objetivos) en razón inversa del cuadrado del aumento, o sea el 75% del disponible ahora. Una comparación de los tamaños relativos de cráter y apertura con los dos aumentos se demuestra en las figuras 61 y 63. Se ve que un incremento de sóló 10 A en la corriente sobre la empleada con el aumento 6/1, da para un aumento de 4,5/1 la correspondiente flexibilidad y uniformidad de iluminación en la pantalla; por ejemplo: un carbón de 14 mm a 50 A con aumento de 4,5/1 tiene la misma tolerancia de movimiento respecto al punto focal del reflector, que uno de 13 mm a 40 A con aumento de 6/1 para una buena iluminación de la pantalla. En definitiva, se obtiene un aumento del 75 % de iluminación en la pantalla, con sólo un aumento del 25 % en la corriente del arco.

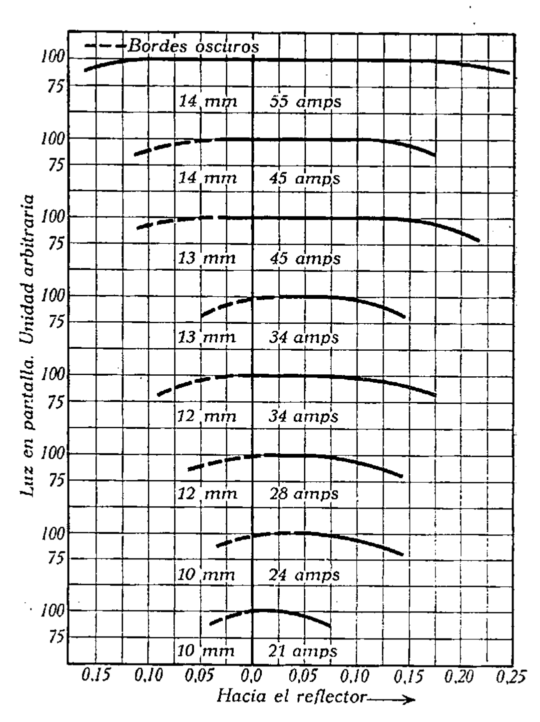


FIG. 64. Movimiento cráter positivo, según el eje del espejo. Carbones positivos SRA. Luz en pantalla v.s., movimiento cráter positivo a lo largo del eje reflector

Arcos de alta intensidad con el positivo rotatorio en corriente continua, para grandes locales (ver fig. 39). El creciente tamaño de los cines, la longitud a veces muy grande de los mismos y las dimensiones extraordinarias de las pantallas son las causas que han contribuído al desarrollo de los arcos de alta intensidad, la cual no puede emplearse, desde luego, económicamente en locales pequeños y de tamaño intermedio; para estos dos tipos se ha desarrollado el arco de alta intensidad simplificada en corriente alterna Cyclex y el Suprex alta intensidad simplificada en corriente continua, en todos los cuales se emplean carbones especiales delgados y cobreados, que permiten obtener con menor consumo las ventajas de una buena iluminación en cantidad y calidad.

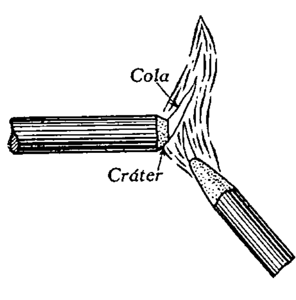


FIG. 65

Vamos a ocuparnos del arco para grandes locales, tema de este apartado, único capaz de proporcionar hoy día las grandes concentraciones de luz que se requieren en esas circunstancias, siguiendo un camino paralelo al que hemos dado en el estudio de los arcos de baja intensidad en la correlación entre las dimensiones del cráter, la corriente y la apertura.

La luz del arco de alta intensidad (fig. 65) procede de dos orígenes distintos: del cráter del carbón positivo y de la llama en forma de cola, o simplemente cola o dardo, como lo llamaremos en lo sucesivo, que parte de dicho cráter. La luz de la cola representa el 30 % de la luz procedente del arco, pero, para iluminar la abertura, no puede ser utilizada en su totalidad por el sistema óptico, por lo que, igual que antes, lo que se utiliza es el cráter, cuya blancura y brillo intrínseco excede a la del carbón volatilizado a la presión atmosférica. Algo más que la punta sólida del carbón incandescente es la causa de tal brillo, y aunque el fenómeno físico real sea distinto, se puede imaginar que tal brillo procede de la parte de la cola que queda comprimida en el cráter del carbón positivo por la corriente de arco del negativo, lo que de tal modo aumenta la luz de la punta incandescente del carbón, que su brillo intrínseco es superior al de otros focos artificiales de luz. El hecho de que, para una corriente dada, la calidad y cantidad de luz producida de esta manera varíe con la forma según la cual la corriente de arco del carbón negativo choca con la cola del carbón positivo, implica una condición, para que se produzca, equivalente a la propuesta respecto a la compresión; esta luz es de color blanco de nieve y una gran potencia en bujías.

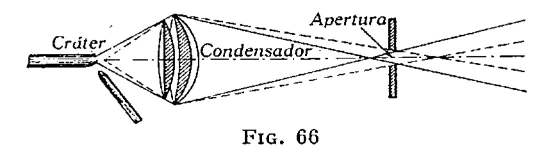


FIG. 66

El colector generalmente empleado es del tipo refractivo (fig. 66) que estudiaremos al tratar de aquéllos en general; puesto que la densidad de corriente es muy alta, de 500 a 800 A por pulgada cuadrada, y la eficacia de este tipo de arco depende del mantenimiento de un cráter en forma de copa perfecto, el carbón positivo sobresale muy poco de su portacarbón y gira continuamente mientras se quema, en tanto que el negativo forma un ángulo de 40° a 60° por debajo de la horizontal. El mecanismo de alimentación de carbones, a medida que éstos se consumen, debe ajustarse de modo que el carbón positivo avance al mismo régimen que se consume, manteniendo el cráter fijo con relación al colector y al punto de intersección con el eje del negativo, el avance del cual es ajustable respecto al del positivo, manteniendo así el arco una longitud uniforme. En este tipo de colectores, el cono de abertura desde el cráter es mucho mayor que en los de baja intensidad, por lo que su eficacia es mucho más grande y el volumen de luz proyectada mucho más amplio; también se emplean colectores reflectores con carbón negativo horizontal o inclinado. Los carbones más empleados se denominan White Flame H. I. y White Flame High Low (llama blanca, alta intensidad, bajo consumo) para el positivo, según se trate de colector refractivo o reflector respectivamente, mientras que el Orotip con mecha se emplea como negativo en ambos. He aquí los tipos más usuales [1]:

Combinaciones de carbones alta intensidad para corriente continua National

COLECTOR REFRACTIVO

Amperios arco	Voltaje aprox. arco	Carbón positivo; ∅ × longitud	Carbón negativo; ∅ × longitud
75-90	54-60	11 mm × 20″ alta int. Llama blanca	11/32″ ó 3/8″ × 9″ Orotip con mecha
120-130	67-69	13,6 mm × 22″ alta int. Llama blanca	3″/8 ó 7″/16 × 9″ Orotip con mecha
140-160	70-72	16 mm × 20″ alta int. Llama blanca	7″/16 × 9″ Recubrimiento extrafuerte Orotip con mecha
Colector reflector			
60-85	48-58	9 mm × 20″ «High-Low» Llama blanca	5/16″ × 6″ ó 9″ Orotip con mecha

La potencia en bujías de la luz del cráter en dirección frontal al arco está representada en el diagrama de la figura 67, donde, como

[1] Tanto de estos arcos como de los anteriores y siguientes se encuentran combinaciones equivalentes en el catálogo SOS, con especificación de amperajes, y cada constructor de linternas indica los carbones y amperajes adecuados a su lámpara.

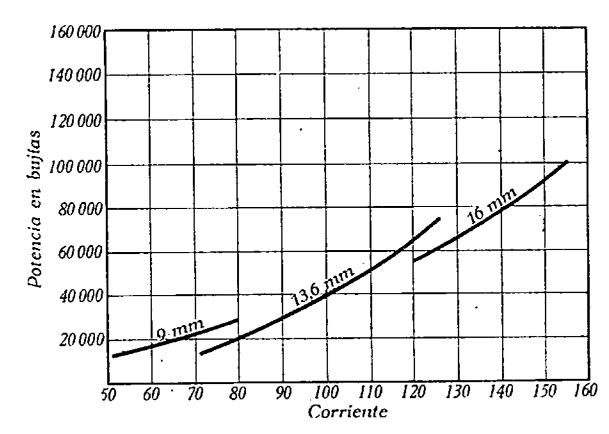


Fig. 67. Corriente. Potencia en bujías del cráter de luz versus corriente

podía esperarse, aquélla aumenta con la corriente. Igual que siempre: si se utiliza la misma intensidad de corriente para dos tamaños de carbones diferentes de la misma composición, el de menor diámetro, que es el que lleva mayor densidad de corriente, es también el de mayor potencia en bujías. La distribución angular de la potencia en bujías de cráteres positivos correspondientes a carbones de 9, 11, 13,6 y 16 mm en un plano horizontal y para un ángulo máximo de 80° a diferentes corrientes, se encuentra representada en la figura 68.

Se ve que, como en los de baja intensidad, la potencia es ligeramente más baja en frente del cráter entre 10° y 20° a cada lado y según el diámetro del carbón, la cual se mantiene bien hasta unos 40° con solamente un descenso del 10 al 17%, con respecto al centro, siendo más acentuada en los de menor diámetro. Las áreas de abertura del cráter, para diferentes tamaños a distintas corrientes, se encuentran representadas en la figura 69, entendiendo por área de abertura del cráter el área del círculo limitado por la cima aguda que rodea el cráter en forma de cazoleta, que se forma en el arco de alta intensidad. Como la sección recta de los carbones de 9, 11, 13,6

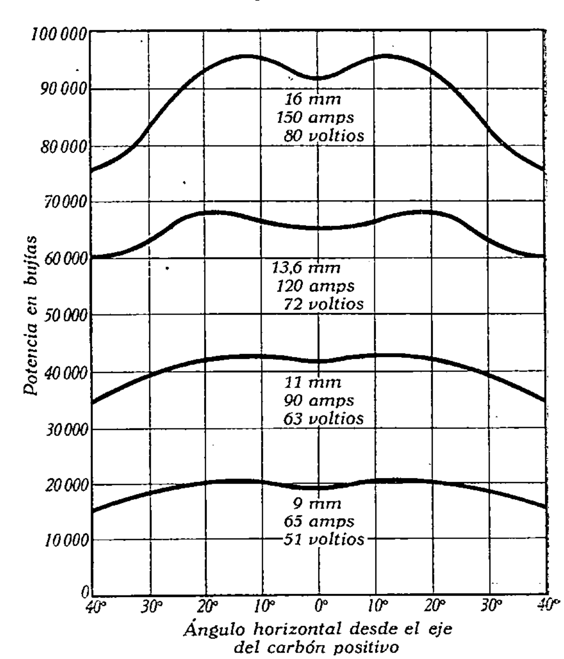


Fig. 68. Distribución angular de potencia en bujías

y 16 mm vale 65, 95, 145 y 201 mm² respectivamente, es claro que las áreas de abertura de los cráteres, aun para las densidades mayores, son mucho menores que las de los carbones. El decremento en la abertura del cráter cuando decrece la densidad de corriente para un mismo carbón, se debe en parte al creciente apuntamiento de la porción de carbón que sobresale del portacarbón, el cual se produce por una disminución en la longitud del carbón quemado en la unidad de tiempo a medida que disminuye la corriente, lo que permite un tiempo mayor para que se queme la superficie caliente del carbón cerca del cráter. Este tamaño de abertura del cráter es importante en relación con el sistema colector empleado, porque se ha reconocido y demostrado de un modo indudable que la eficacia de la luz en proyección cinematográfica decrece rápidamente, a medida que aumenta el área del foco de luz. El brillo intrínseco en bujías por milímetro cuadrado de la abertura del cráter se representa en la fig. 70; se observa que, al igual que la potencia en bujías, el brillo intrínseco crece muy rápidamente a medida que aumenta la densidad de corriente para un determinado tamaño de carbón, y que se obtiene sensiblemente el mismo brillo intrínseco para los distintos tamaños de carbones, a los amperajes prácticos aconsejados para cada tamaño. Este brillo oscila entre 650 y 800 bujías por milímetro cuadrado y muestra de un modo evidente la ventaja de los arcos de alta intensidad para la proyección, sobre el carbón plano de baja intensidad con sus 175 bujías por milímetro cuadrado y sobre la lámpara de filamento de

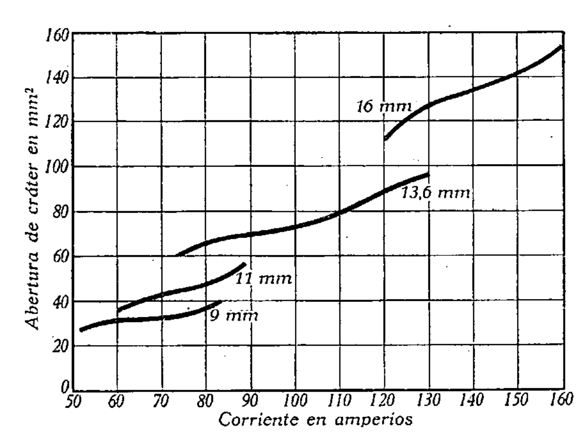


Fig. 69. Abertura de cráter versus corriente

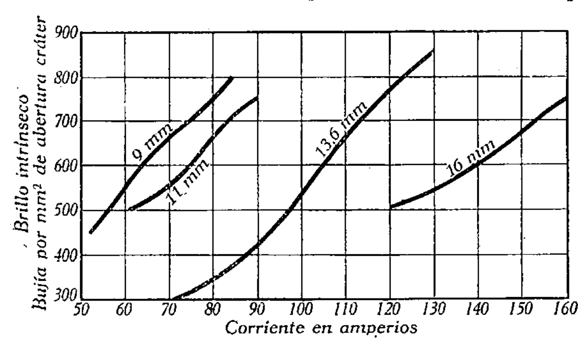


Fig. 70. Brillo v. s. corriente

tungsteno incandescente con sobrecarga de voltaje y un brillo intrínseco de 27 bujías por milímetro cuadrado.

Posición relativa de los carbones. Aun cuando es práctica corriente en muchos tipos de lámparas de esta clase mantener fija la posición angular de los carbones, es bien sabido, según hemos indicado antes, que la posición de los carbones a lo largo de sus ejes afecta mucho el comportamiento del arco de alta intensidad; vamos a ver, que pequeñas variaciones en la posición de los carbones tienen una importancia decisiva en la cantidad de luz y estabilidad del arco, y aun cuando lo que digamos a continuación es válido para todos los arcos de alta intensidad, haremos notar que ello se refiere al caso particular de un positivo de 13,6 mm con un negativo Orotip de mecha a 120 A.

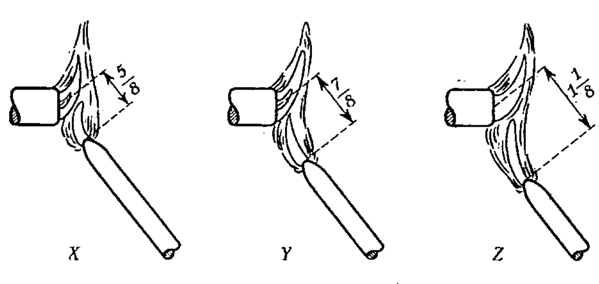


FIG. 71. Tres arcos 120 amps. 70 voltios

Una práctica muy difundida entre los fabricantes de carbones consiste en especificar la corriente a que deben trabajar éstos, pero no dan información acerca del voltaje, lo que se explica fácilmente del examen de la fig. 71, la cual da la representación de 3 arcos a 70 V, pero con longitudes de arco medidas como se indica en la figura entre 1,1/8 de pulgada (28,6 mm) y 5/8″ (15,87 mm); en *X* la llama negativa no toca al carbón positivo, en *Y* lo toca justamente en su borde, y en *Z* lo recubre en gran parte; estos arcos dan enteramente resultados distintos, y, por tanto, más importante que la especificación del voltaje es la posición relativa de los carbones, en cuanto a la calidad y cantidad de luz del cráter. El medio más sencillo de examinar esa influencia consiste en mantener fijo el negativo y des-

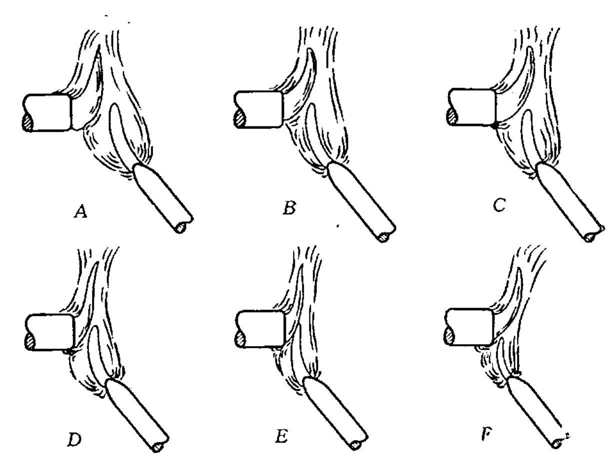


FIG. 72. Cambios en el arco con la posición relativa de los carbones

plazar el positivo a lo largo de su eje, manteniendo constante la corriente mediante la resistencia de compensación; la figura 72 representa el caso para desplazamientos de 1/8″ (3,17 mm) sucesivos y corriente de 120 A. La tensión del arco varía desde 86 V en la posición *A* hasta 55 en la posición *F*; la llama negativa en la posición *A* está muy delante del carbón positivo, de tal modo que la llama positiva sobresale en la parte inferior del cráter del carbón positivo antes que le alcance la llama negativa y diverge después hacia arriba. A medida que el carbón se mueve hacia delante, esta situación se altera de tal modo, que en *D* el borde de la llama negativa empieza a tocar el borde inferior del carbón positivo y prácticamente la totalidad de la llama negativa barre la abertura del cráter comprimiendo la cola en él. Finalmente, en *F* una gran parte de la llama negativa choca con la parte inferior del carbón positivo y solamente una parte muy pequeña barre el cráter positivo. En la figura 73 se ha representado los valores relativos de luz del arco y tensiones para una corriente de 120 A. El máximo de luz útil se obtiene en la posición *D*, como era de esperar después de lo que sabemos sobre la acción de la llama del negativo, y la luz disminuye cuando el positivo se mueve en cualquier dirección desde *D*. La luz útil del arco se hace más permanente, cuanto más decididamente se encuentre la llama negativa en la parte inferior del cráter positivo.

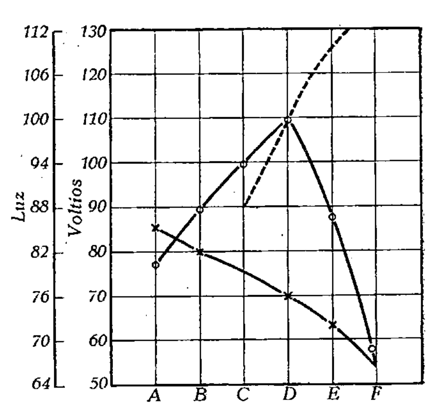


FIG. 73. Cambios en intensidad de luz y tensión de arco

o——o Luz relativa a 120 amperios.
x——x Tensión de arco a 120 amperios.
▪▪▪▪▪▪ Luz relativa cuando varía la corriente manteniendo constante la resistencia compensación.

Ajuste del arco. Para obtener esta permanencia con el mayor volumen de luz útil posible es necesario acercarnos cuanto sea dado a la posición *D*, pero sin que la llama negativa abandone periódicamente la cresta del cráter positivo; en definitiva, debemos estar cerca de la posición *D*, con tendencia a la posición *E*.

Cuando se logra disponer las cosas de esta manera, la iluminación en la pantalla es excelente, y, en caso contrario, y si los colectores de luz en uso se encuentran en la posición acostumbrada, el operador debe ajustar su objetivo y lámpara hasta que obtenga la mancha luminosa deseable en la apertura y el máximo uniforme de luz en la pantalla, obteniendo así, sobre ésta una iluminación permanente, brillante y uniforme. Si la posición del carbón positivo es tal que una parte considerable de la llama negativa envuelve la parte exterior

del cráter positivo, como en la posición *F*, la luz utilizable será todavía permanente, pero habrá decrecido en cantidad, según muestra el diagrama (fig. 73); ello es debido probablemente a que una considerable cantidad de la corriente del arco pasa por la capa exterior del positivo, en lugar de a través del cráter, donde verdaderamente se genera la luz útil. Si, como en la posición *C* o *D*, la llama negativa alcanza y deja alternativamente el borde inferior del positivo, la luz útil será grande, pero un pequeño centelleo pondrá de manifiesto esta oscilación de la llama. Si el carbón positivo se encuentra más hacia atrás, como en *B* o en *A*, de modo que la llama negativa deje libre completamente el borde inferior del positivo, habrá una disminución de la luz, tal como se indica en la figura 73, acompañada de desagradable centelleo de largo período, debido a que la llama negativa no se encuentra en posición para mantener la llama positiva y los gases, en relación correcta con el cráter positivo.

Si el carbón positivo pasa de la posición *C* a la *D* y de ésta a la *E* sin cambiar la resistencia de compensación o la posición del negativo, como se hace a menudo en las cabinas, puede haber un incremento de luz, pero ello irá acompañado de un incremento de corriente; si el positivo se mueve en dirección opuesta hacia *A*, la disminución de luz será mucho más grande que la mostrada en línea continua en la figura 73. La razón de ello es evidente, si se tiene en cuenta el decremento de tensión de arco al pasar de *A* a *F*; en efecto, si la resistencia de compensación y la tensión de la línea se mantuviesen constantes, un movimiento del positivo de la posición *A* a una de las otras posiciones, tendría como efecto un incremento en la tensión aplicada a la resistencia de compensación y, por tanto, un crecimiento en la corriente del arco.

La distancia del eje del carbón positivo a la punta del carbón negativo, para el arco de la figura 66 en la posición más conveniente, es de 5/8″ (15,9 mm); pero experimentos semejantes se han hecho con separaciones de 1/2″ (12,7 mm) y 3/4″ (19 mm), obteniendo los mismos resultados. Dentro de estos límites y con la misma posición relativa de las llamas positiva y negativa, la longitud del arco no tiene un efecto apreciable sobre la luz útil. Resultados semejantes se obtienen con carbones de 16 mm.

En lámparas de espejo de alta intensidad con el negativo inclinado solamente un pequeño ángulo por debajo de la horizontal, tienen validez los principios de ajuste que acabamos de dar; suponiendo el cráter positivo a la distancia correcta del espejo, tal como es indicado por el puntero correspondiente o por la cartulina sobre la que se proyecta la imagen del arco, el eje del carbón negativo debe cortar a la cara del cráter positivo en un punto ligeramente debajo del centro, en muchos casos a unos 2,4 mm. Cuando el arco esté propiamente ajustado, la llama negativa del arco cubrirá ligeramente el labio inferior del carbón positivo, produciendo una luz de proyección libre de centelleo molesto.

Con los dos tipos de colectores de luz es importante que ambos carbones se encuentren en el mismo plano vertical, o sea que estén alineados lateralmente, y también es muy importante que el cráter positivo se encuentre en la posición indicada por el fabricante de la lámpara o linterna; si se encontrase que se obtiene una luz más perfecta para otra posición del cráter positivo distinta de la indicada por el fabricante mediante el puntero o la cartulina donde se recibe la imagen, la razón probable será un desplazamiento del sistema colector de luz de su posición correcta. En tal caso, el cráter debe mantenerse en aquella mejor posición y desplazar el sistema colector hacia delante o hacia atrás, hasta que se encuentre la mejor iluminación.

El funcionamiento de la linterna con el carbón positivo avanzado sobre su posición correcta, no sólo reduce el volumen de luz, sino que acorta la vida del carbón, bastando que sobresalga 3,2 mm para que la duración del carbón se reduzca en un 10 %.

Si el arco es demasiado corto, puede hacer imposible ajustar el avance del carbón con la velocidad a que éste se consume, y lo mismo sucederá si el avance del negativo se hace más de prisa que la velocidad a que se consume, ya que ello origina un acortamiento de la longitud del arco. Por último, debe evitarse sobrecarga de los carbones, a fin de impedir el que éstos se afilen.

Arcos de alta intensidad simplificada en corriente continua o sistema Suprex. El tipo de arco que acabamos de describir no es aplicable más que a grandes locales, ya que por su gasto inicial y por su excesivo consumo, sólo en tales casos está justificado; para llenar el hueco existente entre los de baja intensidad y dicho arco se han ideado tres sistemas de alta intensidad simplificada: uno de ellos en corriente continua; y los otros dos en corriente alterna, que permiten a los teatros de tamaño pequeño y mediano obtener las ventajas de los de alta intensidad a un coste relativamente reducido, obteniéndose, en cambio, en la pantalla, una iluminación que es superior a la proporcionada por los de baja intensidad en un 20 al 60 %, y también de mejor calidad. Vamos a ocuparnos de los de corriente continua, también llamados *Suprex* por los americanos.

Este nuevo tipo de arco funciona con carbones de alta intensidad de más pequeño diámetro y a corrientes más bajas que las del últimamente descrito.

Los carbones se han diseñado dé tal modo que con algunas precauciones, el positivo no necesita girar y el negativo puede disponerse coaxial con el positivo; ambos están protegidos de oxidación y su resistencia eléctrica se reduce mediante una capa de cobre, que permite fijarlos a distancia conveniente del arco en los portacarbones. Estos carbones se queman con la misma formación de cráter y dan en la pantalla la misma luz brillante blanco-nieve que el arco grande de alta intensidad que hemos descrito sin carbones cobreados.

El consumo y la capacidad tolerable de corriente de los carbones Suprex se da a continuación:

Combinaciones de carbones «Suprex»

Carbones; Ø × longitud	Intervalo de corriente	Intervalo de tensión	Consumo en pulgadas hora		Cráter en posición efectiva. Diámetro en pulgadas
			Positivo	Negativo	
6 mm × 12″ Suprex positivo con mecha. 5 mm × 9″ Suprex negativo sólido....	32-40	31-40	6,5-13,5	3,0-4,5	0,14-0,16
7 mm × 12″ Suprex positivo con mecha. 6 mm × 9″ Suprex negat. con mecha .	42-50	31-40	6,5-13,5	3,0-4,5	0,15-0,20
8 mm × 12″ Suprex positivo con mecha. 6,5 ó 7 mm × 9″ Suprex negativo con mecha............	56-65	31-40	6,5-13,5	3,0-4,5	0,20-0,25

En el arco Suprex, los carbones se disponen en posición horizontal, y el campo magnético resultante de la corriente a través de los carbones, tiene alrededor del carbón igual intensidad en todos los sentidos, cuya consecuencia es que la cola del cráter positivo rodea éste en una capa casi uniforme (fig. 74); ello tiene como resultado una falta de estabilidad, pudiéndose producir el hecho de que el cráter se produzca

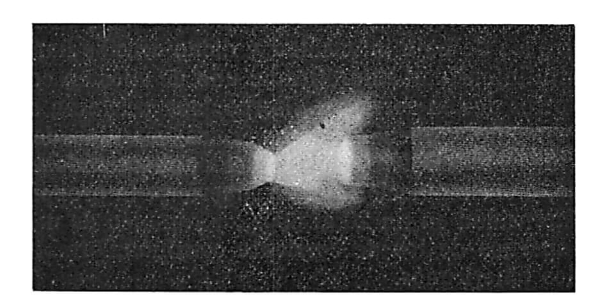


FIG. 74. Arco «Suprex» sin campo magnético suplementario

o queme de lado, originándose un notable cambio de luz en la pantalla. En algunos tipos de arcos se ha introducido un campo magnético auxiliar, que aumenta el flujo magnético debajo del arco y se opone a él encima, lo que da a la cola y llama una tendencia de inclinación arriba, como se ve en la figura 40, asegurando una gran estabilidad en la corriente del arco y en la formación del cráter; para ello, el eje del carbón negativo se dispone ligeramente debajo del positivo, a fin de compensar la dirección angular del arco.

El beneficio obtenido con este campo auxiliar en cuanto a permanencia y estabilidad de iluminación en la pantalla, es muy notable, especialmente cuando el arco trabaja a base de la línea de flúido a 115 V a través de una gran resistencia de compensación. Es, desde luego, esencial que el campo magnético tenga la dirección adecuada, y cuando se haga una reparación en la linterna, debe cuidarse de comprobar tal dirección.

La distancia del cráter al reflector es la parte más importante en el manejo de este arco; una pequeña variación en esta distancia produce una decidida variación en la luz total recibida por la pantalla y en el contraste en brillo entre el centro y las partes marginales de la misma.

La relación de avance del carbón positivo al negativo a medida que se queman, debe ajustarse con la corriente de trabajo estipulada para que se pueda mantener fácilmente una longitud uniforme del arco y su adecuada posición respecto al espejo; si aumenta la corriente en el arco, aumenta la relación de consumo del positivo al negativo, lo que exige un ajuste correspondiente en la relación de avance de los respectivos carbones; al mismo tiempo aumenta la iluminación total de la pantalla, pero se modifica grandemente la distribución relativa de luz entre el centro y los bordes de la pantalla, por lo que siempre debe trabajarse dentro de los límites de aquélla, estipulados para ese diámetro de carbones. Igual que antes: variaciones en la longitud del arco no afectan apreciablemente la iluminación total ni la distribución de luz en la pantalla con tal de que la corriente y posición del cráter positivo permanezcan invariables; sin embargo, cuando las variaciones en la longitud son grandes puede haber dificultades para el buen funcionamiento.

Las mejores condiciones de trabajo se obtienen cuando se emplea como fuente de energía eléctrica una tensión constante bastante próxima, en cuanto a su tensión, a la del arco, para que permita el uso de una resistencia de compensación relativamente pequeña; o bien —se utiliza muchas veces— una fuente de energía con una resistencia interior negativa; esto es, su característica voltios-amperios es descendente; o dicho de otra manera: a un gran incremento en la corriente corresponde una disminución en la tensión aplicada al arco. De otra parte, su tensión en vacío no debe exceder en mucho a la tensión de trabajo del arco. Existen varios tipos de unidades de esta clase en el mercado, para tal disposición de arcos de alta intensidad simplificada y carbón positivo no rotatorio.

El tipo de arcos de alta intensidad simplificada, ya sea de corriente continua o de corriente alterna, da la mejor proyección solamente dentro de estrecho intervalo en la posición del arco, lo que exige un mecanismo de control adaptado al mantenimiento de la posición del arco dentro de esos límites, y en el caso especial de iluminación Suprex deben poseer, además, una amplitud muy grande en la relación de avance positivo-negativo de los carbones.

Una observación muy importante es que en esta clase de arcos, tanto en corriente continua como en corriente alterna, la bola brillante de gas de la que la luz emana, sobresale algo de los labios del cráter, cuyo resultado es que la luz a ángulo recto respecto a las barras de carbón, es mucho mayor que en los arcos de baja intensidad, donde el brillo más alto está confinado en el fondo del cráter; este hecho, unido al desarrollo de objetivos de proyección de gran luminosidad, es decir, que toman un cono de luz mucho más abierto que los objetivos anteriormente en uso, y, especialmente, con los objetivos con las caras tratadas de que hablaremos en el capítulo dedicado a su estudio, ha conducido al uso de espejos con un ángulo de abertura superior al de 120°, empleado en las linternas de baja intensidad. Un buen ejemplo es la linterna Ashcraft, en la que su ángulo de abertura alcanza el valor de 140°, siendo de 84 cm (33″) la distancia entre el espejo y la apertura y la distancia cráter-reflector, 10,6 cm (5″).

IV. Arcos en corriente alterna

Como ya hemos dicho, hay hoy en el mercado dos tipos de arcos de corriente alterna que permiten obtener una perfecta iluminación en la pantalla tanto en nivel como en permanencia, uniformidad y contenido de color o calidad; uno de ellos, el primero cronológicamente, opera cambiando la frecuencia de la corriente alterna ordinaria en consonancia con el período de obturación del proyector, mientras que el otro opera en un principio semejante al de los arcos de alta intensidad simplificada en corriente continua. Como la exposición del primero puede exigir un mayor lujo de detalles que el último, vamos a ocuparnos en primer lugar de éste.

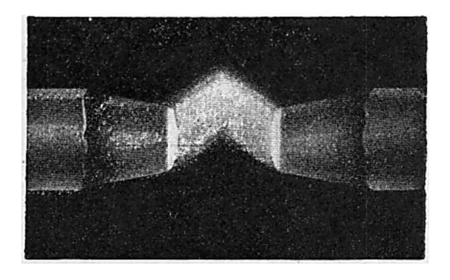


FIG. 75. Arco de corriente alterna alta intensidad con los carbones separados

a) Arcos de alta intensidad en corriente alterna. Estos arcos permiten a los teatros pequeños y de tamaño intermedio obtener las ventajas de una luz blanco-nieve muy semejante en contenido de color a la proporcionada en los teatros grandes mediante los arcos de alta intensidad en corriente continua, lo cual se consigue quemando en corriente alterna los carbones a través del secundario de un transformador especial, sin necesidad de la resistencia de compensación ni el grupo o rectificador para corriente continua que se precisaba hasta hace poco en la mayoría de los locales. Su característica es enteramente diferente de los arcos hasta ahora descritos, y los focos de luz se encuentran concentrados en dos pequeños volúmenes próximos a las puntas de los carbones, tal como se ve en la figura 75; cualquiera de ellos puede enfocarse en la apertura mediante el espejo reflector, y al menos es posible obtener un 15 % más de luz (para un colector y apertura dados) que con un arco de baja intensidad en corriente continua utilizando la misma línea de alimentación, pudiéndose obtener un

aumento ulterior importante de luz mediante colectores ópticos especialmente adaptados a esta clase de arcos, según veremos después.

Combinaciones de carbones cobreados para estos arcos

	8 mm × 12″ Ø × longitud	7 mm × 12″ Ø × longitud	6 mm × 10″ Ø × longitud
Corriente (amperios)	75-80	60-65	40-45
Voltaje aproximado arco ..	24-29	23-26	22-25
Consumo (pulgadas × hora).	4,0-5,5	4,0-5,5	4,0-5,5
Densidad de corriente (amperios/1″²)................	960-1025	1000-1090	910-1030

Como se desprende fácilmente de este cuadro, tales arcos son de baja tensión y altas densidades de corriente; estas últimas varían entre 910 y 1090 A por 1″² de sección recta del carbón, la cual es muy superior a los 140-188 que corresponde a los de baja intensidad en corriente continua y algo más alta que la que corresponde al carbón positivo en corriente continua de alta intensidad, unos 450-900 A por 1″². Otra diferencia esencial es que mientras en el arco de alta intensidad en corriente continua el carbón positivo está sujeto en un punto cercano al arco y gira durante el funcionamiento, aquí ambos carbones están sujetos en el extremo opuesto al arco y ninguno de los dos tiene rotación; será, por consiguiente, necesario aumentar la conductancia del carbón, para lo que ambos carbones se encuentran cobreados en su superficie, lo que proporciona un paso de baja resistencia a la corriente desde el portacarbones hasta cerca del extremo donde el arco se realiza, que evita la oxidación, pero no interviene en la corriente del arco.

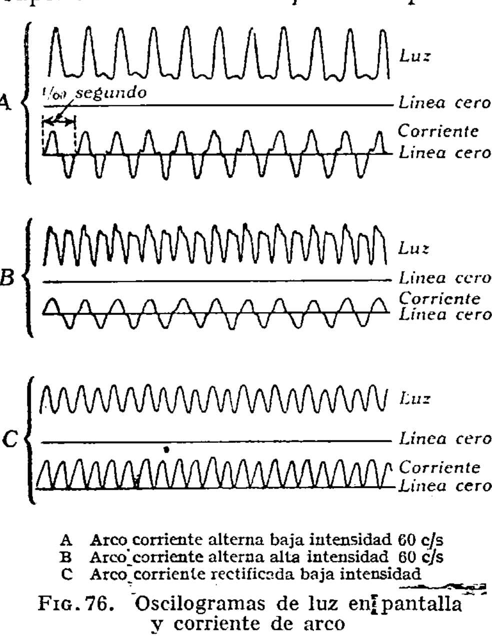
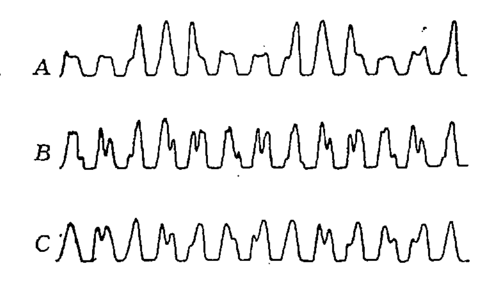


FIG. 76. Oscilogramas de luz en pantalla y corriente de arco

Eficacia comparada de este arco. Aun cuando a primera vista puede parecer que empleando este arco en la proyección se producirá un centelleo semejante al que se experimenta en los arcos alimentados en baja intensidad con corriente alterna y carbones neutros con mecha,

es fácil ver que se trata de un tipo distinto de arco en el que la luz lanzada sobre la pantalla es más semejante, en cuanto a la forma de la onda de luz, a un arco de corriente continua alimentado por un rectificador. En la figura 76 se muestran los oscilogramas de corriente y luz en la pantalla, sin obturación en el proyector, para arcos de corriente alterna en baja intensidad y en alta intensidad y también para corriente continua en baja intensidad con rectificador. La luz instantánea en la pantalla se mide mediante una célula fotoeléctrica y un sistema amplificador lineal, entre la salida de célula y la entrada del amplificador, la corriente del cual se lleva a un oscilógrafo que registra en coincidencia las corrientes de arco y del sistema amplificador.



A Arco B. I. C. A. a 60 c/s
B Arco A. I. C. A. a 60 c/s
C Arco B. I. corriente rectificada

FIG. 77. Oscilogramas de luz instantánea en pantalla. Obturador de dos palas 1440 r. p. m. que corresponde a una velocidad de película de 90 pies por minuto

La dirección de la corriente en un arco de baja intensidad en corriente alterna, cambia cada medio período, según es conocido; la luz procedente del arco, como se indica en la figura, crece hasta un máximo cuando el carbón que se encuentra en el punto focal es positivo, y decrece y se mantiene a un valor muy bajo cuando el mismo carbón en el otro medio período se hace negativo. Con el arco en corriente continua en baja intensidad accionado por rectificador *monofásico*, la corriente es unidireccional, pero desciende a cero cada medio período, mientras que la luz en la pantalla crece hasta un máximo en la mitad del primer medio período, para decrecer a la mitad de su valor; cuando la corriente pasa por cero, vuelve a crecer hasta un máximo que no es tan alto como el anterior, y desciende nuevamente a un valor bajo; en resumen: hay una fluctuación, pero la luz durante cada medio período crece aproximadamente al mismo nivel. Veamos lo que sucede en el arco de alta intensidad en corriente alterna; los cambios en la dirección de la corriente se realizan en la forma usual, pero la luz en la pantalla es completamente diferente de la del de baja intensidad; en lugar de descender a un valor bajo mientras el carbón en foco es negativo, la luz crece aproximadamente al mismo valor que adquiere cuando el carbón en foco es positivo, si bien la forma de la onda es ligeramente diferente. En resumen, excepto en lo que se refiere a la forma de la curva, la luz pro-

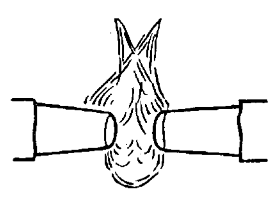


FIG. 78. Carbones de 8 mm A. I. C. A. Sobrecargados: 90 amps., 35 voltios

yectada en la pantalla se aproxima más a la luz en corriente continua con rectificador que a la del de baja intensidad en corriente alterna.

Cuando el obturador del proyector funciona, es bien sabido que se produce en la pantalla con corriente alterna en baja intensidad un centelleo o *flicker*, que es la causa fundamental de la poca aceptación de estos arcos, lo que se pone muy bien de manifiesto en la figura 77; la luz en la pantalla de una abertura del obturador varía enormemente con respecto a la abertura siguiente, lo que se debe a que durante el medio período en que el carbón en foco es negativo para la corriente, la luz en la pantalla desciende a un valor comparativamente bajo. En cambio, en el de alta intensidad, aunque la forma de la curva de iluminación es muy irregular, es mucho más sensiblemente constante para cada abertura del obturador; por ello se aproxima mucho a la obtenida con obturación en corriente continua y con rectificador.

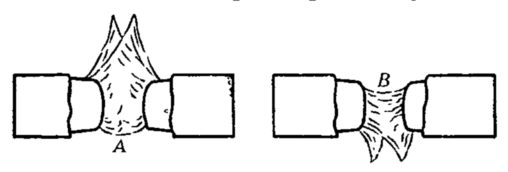


FIG. 79. Carbones de 8 mm A. I. C. A. Hipocargados 60 amps., 24 voltios. Mostrando diferentes posiciones del arco en su «aleteo» alrededor de los extremos de los carbones

Condiciones de ajuste de los carbones. Como siempre, deben respetarse escrupulosamente los valores recomendados para cada tipo de carbones por el fabricante. Si la corriente es demasiado grande, el cobre funde a considerable distancia del arco, tal como se ve en la figura 78; el arco se hace inestable y la tensión de arco y consumo de carbones aumentan en tal medida que pueden estar fuera del intervalo de control del mecanismo de avance de carbones; si, por el contrario, la corriente fuera demasiado baja, el cobre no fundiría a distancia suficiente del arco, la luz quedaría muy reducida y la corriente y tensión de arco serían variables; ello lleva consigo un arco inestable en el que la llama oscila de la parte superior a la inferior de los carbones, como se ve en la figura 79, mientras que si se trabaja dentro de los límites de tensión y corriente recomendados, no se produce ninguno de estos hechos desagradables (fig. 80). Para el buen funcionamiento del arco y buena proyección de luz, es esencial que la longitud del arco sea mantenida dentro de límites definidos y que tenga la forma característica, fácil de identificar, que se muestra en la figura 80; en ella se trabaja en condiciones correctas a 80 A y 20,5 V con carbones de 8 mm, la capa de cobre funde hasta 0,35″ (9,5 mm) del extremo del carbón, la longitud del arco es de 0,27″ (7 mm), y el extremo del carbón tiene 0,23″ (5,8 mm) de diámetro; el arco en sí consiste en una

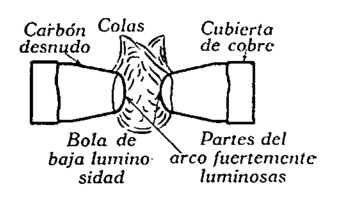


FIG. 80. Carbones de 8 mm. A. I. C. A. 80 amps., 25,5 voltios. Buenas condiciones de trabajo

parte altamente luminosa cerca de la punta de cada electrodo, que se aprecia mejor en la figura 75; una parte de baja luminosidad en forma de bola que se extiende a los lados y por debajo de los electrodos, y de dos colas de la llama muy cortas y perfectamente definidas. Precisamente a la parte fuertemente luminosa cerca de las puntas es a la que nos referiremos después, al hablar del sistema colector de luz.

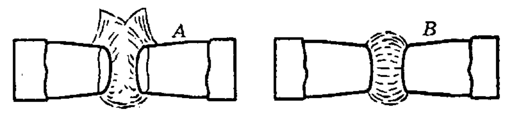


Fig. 81. Carbones de 8 mm A. I. C. A. 80 amps., 23 a 24 voltios: (A) Arco corto. Buenas condiciones de funcionamiento: (B) Arco más corto, condiciones defectuosas de trabajo

Cuando disminuye la longitud del arco se mantiene esencialmente la misma forma, si las condiciones de trabajo son favorables, hasta que se llega a unos 24 V y 0,23″ (5,8 mm) de longitud; la figura 81 muestra en A el arco justamente antes de alcanzar aquel punto, con buenas condiciones de combustión, y en B justamente después del mismo, con longitud de arco más corta y malas condiciones para la combustión; al pasar de aquel punto crítico, la corriente del arco comienza a ser turbulenta, las dos colas y partes fuertemente luminosas de las puntas pierden su identidad, y el conjunto adquiere un aspecto hirviente; hay un centelleo rápido, la tensión y corriente se hacen oscilantes y se observa un notable efecto de sombra de los propios electrodos.

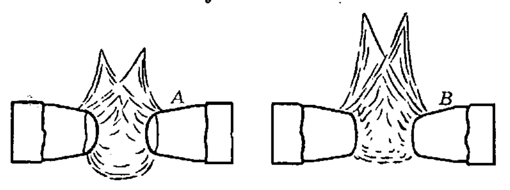


Fig. 82. Carbones 8 mm A. I. C. A.: 80 amps., 28 a 29 voltios; (A) Arco largo, buenas condiciones de funcionamiento. (B) Arco más largo. Condiciones defectuosas de trabajo

Si la longitud del arco aumenta más allá de lo que muestra la figura 80, se mantiene la forma del arco, si las condiciones de trabajo son adecuadas, hasta que aquélla alcanza 0,35″ (8,6 mm); la figura 82 muestra en A el arco inmediatamente antes, y en B inmediatamente después de alcanzar esa longitud. A esa longitud y más allá de ella, el arco presenta una tendencia a hincharse hacia arriba, de modo que desaparece la bola de la parte inferior y las dos colas se hacen muy grandes; al mismo tiempo, las dos regiones fuertemente luminosas se deforman según se ve en la figura; por último, el arco se hace muy inestable, saltando repetidamente de la posición A a la B y recíprocamente.

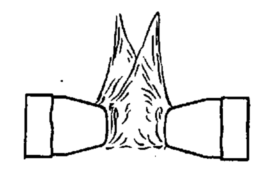


Fig. 83. Carbones 8 mm A. I. C. A.: 80 amps., 26 voltios. Arco de longitud media, perturbado por fuerzas exteriores

Otro efecto que debe considerarse y corregirse es el mostrado en la figura 83; el arco es de longitud media y debería tener la apariencia normal de la figura 80 correcta; pero se encuentra perturbado por

agentes externos, presentando una tendencia a pasar de la posición correcta a la mostrada en la figura 83, al mismo tiempo que se producen variaciones en la corriente y tensión de arco, centelleo y desigual distribución de luz, todo lo cual puede ser producido por un excesivo tiro de aire de la linterna o por un desequilibrado campo magnético de los conductores de corriente, o todavía por otras causas que tiendan a deformar el arco. En tal caso, suponiendo que el diseño de la lámpara, el tiro y la disposición de los conductores se han corregido para evitar dicho efecto, los carbones de 8 mm a 80 A deberán mostrar buenas características de combustión para longitudes de arco entre 0,23″ y 0,35″, con una tensión de 24 a 29 V. Habrá, no obstante, un cambio perceptible en la intensidad de luz entre las dos posiciones límites, pero el intervalo de variación tolerable de un instante a otro es mucho menor que el intervalo completo de trabajo satisfactorio.

A 75 A, las longitudes de arco que dan condiciones de combustión satisfactorias con carbones de 8 mm, son prácticamente las mismas que para 80 A, y la tensión de arco un voltio menos. Para los carbones de 7 mm calibrados de 60 a 65 A, las condiciones correspondientes de buen funcionamiento son: una longitud de arco de 0,21″ a 0,31″ (5,3 a 7,9 mm), con una tensión de arco de 23 a 26 V.

Ajuste del arco respecto al sistema colector de luz. Las linternas que emplean este tipo de arco tienen generalmente un carbón horizontal, con la punta del mismo en el punto focal de un espejo elíptico, que proyecta la luz recogida del carbón y del arco en la apertura y película. Tales linternas van provistas de un sistema que lanza la imagen del arco en una cartulina blanca en la que se determina la correcta posición del arco con respecto al espejo, y la longitud del mismo. Tienen también un sistema de ajuste y avance de los carbones, para mantenerlos en su posición apropiada uno respecto al otro y al sistema colector y apertura; es muy importante que la punta del carbón de cara al espejo se mantenga a la distancia adecuada de dicho espejo, pues una variación en cualquier dirección de la posición correcta origina un rápido descenso en la totalidad de la luz en la pantalla, pudiendo producirse un contraste perturbador en el brillo entre el centro y los bordes de la misma. El mecanismo de avance de los carbones debe ajustarse para mantener constante la longitud del arco, pues mientras un moderado aumento en la longitud del mismo no perturba seriamente el volumen ni la distribución de luz en la pantalla, en tanto se mantenga la corriente y posición del mismo, un arco demasiado corto produce una distribución de luz muy pobre y un trabajo de arco inseguro.

b) El arco de corriente alterna sistema Cyclex. Antes de introducirse en el mercado el sistema Suprex y el tipo de arco en alta intensidad en corriente alterna que acabamos de describir, ha tenido un éxito considerable el sistema Cyclex, de que ahora nos vamos a ocupar,

porque con poca corriente (52 a 65 A), respecto al consumo del de alta intensidad en corriente continua, y utilizando carbones impregnados de alta intensidad de 7 mm, relativamente delgados, permite obtener una intensidad de luz y contenido en color de valor muy superior a las de los arcos de baja intensidad en corriente continua, a un precio de coste en su funcionamiento no superior al de dichos arcos de baja intensidad; aun cuando la aparición de la alta intensidad simplificada en corriente continua ha reducido algo sus ventajas para locales de tamaño mediano y pequeños, la calidad de este foco sigue permitiéndole mantenerse en primera línea entre los otros dos por la facilidad y economía en su manejo.

En oposición al sistema Suprex y alta intensidad en corriente alterna, en éste se actúa, no sobre la intensidad de la corriente para obtener un mayor volumen y contenido en color de la luz, sino sobre la frecuencia de la corriente, lo que le hace esencialmente distinto de los demás, consiguiéndose eliminar el centelleo o *flicker* de los arcos de baja intensidad en corriente alterna, que, como sabemos, es la causa principal de su poca aceptación a los fines de proyección.

Origen del parpadeo y modo de evitarlo. El examen de la figura 77, *A* nos ha mostrado, cuando hemos hablado de los arcos en corriente alterna, la desigualdad en las crestas consecutivas de la iluminación que se produce por el efecto de la marcha del obturador del proyector con respecto a la misma imagen *A* de la figura 76, cuando no funciona dicho obturador. Aun cuando al tratar de la obturación en el *proyector* nos hemos de ocupar más detenidamente del asunto, se necesita dar aquí una somera idea de la causa de este fenómeno que se manifiesta en la pantalla como un centelleo o parpadeo de la imagen proyectada sobre la pantalla; algo así como una pulsación relativamente lenta en la intensidad de la iluminación de aquélla.

Como ya sabemos, mientras la película está en movimiento delante de la apertura para pasar de un cuadro al siguiente, la luz que del foco se lanza sobre la pantalla debe ser interceptada a fin de que el espectador no perciba el movimiento de la película, lo que generalmente se hace mediante un círculo de metal o cartón en rotación delante de la apertura, que tiene recortados dos sectores opuestos, transparentes, por tanto, a la luz, los cuales para más sencillez supondremos de momento de 90° de abertura angular; sincronizando su movimiento de rotación con el de arrastre de la película, se consigue que uno de los sectores opacos cubra la ventanilla o apertura de proyección por donde desfila la película, mientras ésta, está en movimiento. Como en los proyectores de película normal ésta se mueve a razón de 24 cuadros por segundo, si movemos a 24 revoluciones por segundo el obturador, habrá, naturalmente, 48 interrupciones de luz por segundo; es claro que con una sola pala habría bastante para aquella finalidad, pero generalmente lleva dos, de una parte para equilibrar el eje del esfuerzo desarrollado por la fuerza centrífuga originada por la rápida rotación, y de otro lado porque los tránsitos en la pantalla de luz a

oscuridad los percibe el ojo humano como un parpadeo, tanto más sensiblemente cuanto más lento sea ese tránsito.

De igual modo que la experiencia ha demostrado que son suficientes 24 imágenes por segundo para la descomposición y recomposición de una escena en movimiento, también aquélla *ha demostrado que se requiere un mínimo de 48 interrupciones de luz por segundo*, para que el ojo se haga insensible a aquella sensación de parpadeo (Terman); en definitiva, si el obturador gira a 24 revoluciones por segundo, hay 48 obturaciones de luz en el mismo tiempo que se proyectan 24 imágenes.

Pero, según sabemos, la corriente industrial tiene una frecuencia de 50 períodos por segundo, y, por tanto, se anula la corriente en los carbones igual número de veces, y aun cuando el arco se mantenga si se alimenta con esta corriente, habrá en esos momentos una reducción en el brillo del foco, aun sin tener en cuenta el efecto suplementario de que el carbón enfocado por el colector de luz al hacerse negativo para la corriente durante medio período, no produce tanta luz como en el otro medio; de momento prescindiremos de este efecto para la exposición elemental que tratamos de hacer.

Supongamos que, con cierta aproximación, tanto la corriente alterna como la obturación de la luz tienen naturaleza puramente sinusoidal de frecuencias 50 y 48 períodos por segundo, que llamaremos respectivamente f_c y f_o, y sea a la amplitud de la onda de luz a cuyo cuadrado es proporcional la luz recibida en la pantalla; el valor instantáneo de la misma podrá escribirse así:

$$a \cos 2\pi f_c t \cdot \cos 2\pi f_o t$$

que por una sencilla transformación trigonométrica, que no es del caso, se convierte en

$$\frac{a}{2} \cos 2\pi (f_c + f_o) t \cdot + \frac{a}{2} \cos 2\pi (f_c - f_o)$$

y como $f_c + f_o = 98$, y $f_c - f_o = 2$ períodos por segundo, resulta que *la superposición de la corriente alterna y la obturación producen en la luz de la pantalla dos parpadeos:* uno de 98 períodos por segundo, que no se percibe sensiblemente por el ojo, y *otro de 2 períodos por segundo*, que, por ser inferior a 48, *es claramente perceptible por aquél*, dando en la pantalla la sensación de una palpitación en la iluminación de la misma y, por tanto, en la claridad de las imágenes, con la frecuencia relativamente lenta de 2 períodos por segundo. Si la corriente fuera de 60 períodos por segundo, esta componente sería, según el mismo cálculo, de 12 períodos por segundo, que, aunque más rápida, es también perceptible en forma desagradable.

En vista de la mayor pulsación que se obtiene para los 60 períodos por segundo, ocurre enseguida pensar que aumentando la frecuencia

de la corriente alterna que alimenta el arco, tal vez se pueda llegar a hacerla igual o superior al tope de percepción, y esto es lo que se obtiene por el sistema Cyclex; busquemos una frecuencia mínima f_c, tal que

$$f_c - 48 = 48, \text{ de donde } f_c = 96;$$

es decir, con una corriente alterna de 96 períodos por segundo dejará de percibirse tal parpadeo [1], y éste será el menor valor que deberá tomar dicha frecuencia. *La frecuencia de la corriente alterna debe ser como mínimo doble de la obturación o cuatro veces la velocidad de rotación del obturador*, para que no haya *flicker*, con aquel tipo de obturador.

Se ha supuesto que el proyector trabaja a razón de 24 cuadros por segundo, lo que no siempre es exacto, pues unas veces los motores que lo arrastran van más lentos por algún defecto en su funcionamiento o por disminución en la tensión de la red, y, otras, un retraso en el desarrollo del programa del espectáculo, o un programa excesivamente largo, impulsa al operador a trabajar a mayor número de imágenes para ganar tiempo (práctica poco aconsejable por afectar nocivamente tanto a la proyección como al sonido); entonces el obturador no marchará a esa velocidad y la frecuencia de la corriente alterna más conveniente será distinta.

Conociendo la velocidad lineal de la película v_p, o número de metros por segundo que desfilan por delante de la apertura, podremos determinar la del obturador mediante la siguiente proporción:

$$\frac{v_n}{v_p} = \frac{24}{x} \qquad x = \frac{v_p \cdot 24}{v_n}$$

en la que v_n es la velocidad normal de la película a razón de 24 imágenes por segundo, que vale 457,2 mm por minuto (90 pies), y x es el número de vueltas que el obturador da ahora por segundo; así, si la película marcha a razón de 88 pies, se tendrá

$$x = \frac{88 \times 24}{90} = 23{,}5 \text{ r p s}$$

y, por tanto, la frecuencia a elegir para la corriente alterna o que debemos obtener en el sistema Cyclex para alimentar los arcos, será $4 \times 23{,}5 = 94$ revoluciones por segundo. De aquí se deduce que el cambiador de frecuencia debe tener un margen de frecuencias que permita ajustar ésta a la velocidad del proyector.

---

(1) En realidad, la cosa es más compleja, y la elección de los 96 períodos por segundo se justifica por otras razones además de la dada, pero de momento basta con lo anterior; se comprende, además, fácilmente que ya la hipótesis que hemos empleado, de suponer la obturación sinusoidal, dista de ser cierta. Hemos ideado, a pesar de todo, esta explicación porque es muy sencilla e intuitiva.

Cambiador de frecuencia. Se trata de un transformador rotatorio movido por un motor de 3/4 de CV, excitados ambos por corriente alterna trifásica de la red a 220 V y 50 ó 60 períodos. El cambiador de frecuencia o transformador rotatorio propiamente dicho, se compone (fig. 84) de un *stator* (devanado estacionario) alimentado por la corriente alterna de la red, en el que se produce un campo magnético giratorio; dentro de él gira el rotor (devanado giratorio) a una predeterminada velocidad y en sentido opuesto al de rotación del campo magnético engendrado por el stator, y de aquí se saca la corriente a la frecuencia de 96 períodos por segundo.

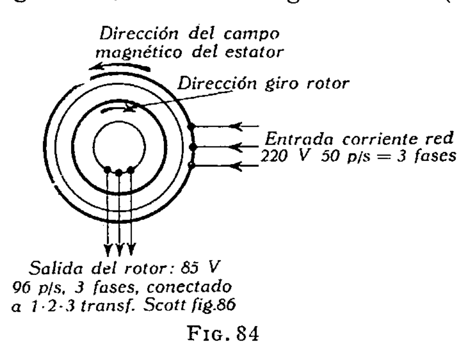


FIG. 84

Este campo magnético gira, según es sabido, a la misma velocidad angular que la corriente, es decir, a razón de 60 ó 50 revoluciones por segundo.

Si el rotor (secundario) permaneciera estacionario sin girar, se engendraría en él una corriente de la misma frecuencia que la aplicada al primario, es decir, de 60 ó 50 períodos por segundo, y trifásica; pero si este secundario girase en la misma dirección y a la misma velocidad que el campo, no se produciría en él ninguna corriente, mientras que si girase en sentido contrario se produciría una corriente de mayor frecuencia que la del primario, y si lo hiciese a menor velocidad y en el mismo sentido, la corriente engendrada en él sería de menor frecuencia que la primaria.

Siendo el tipo normal de cambiador de frecuencia de cuatro polos, por cada ciclo de variación de corrienteeen el primario deberá girar el rotor 180° por segundo, o, lo que es igual, $180 \times 60 = 10800°$ por minuto; luego para que la corriente aumente un ciclo en el rotor, éste deberá dar $\frac{10800°}{360°} = 30$ revoluciones por minuto. Como la corriente alterna en el primario es de 60 períodos por segundo, habremos de aumentar la frecuencia en $96 - 60 = 36$ períodos y, por tanto, el rotor debe girar a razón de $30 \cdot 36 = 1080$ revoluciones por minuto, mientras que si la corriente en el stator fuera de 50 períodos por segundo, habría que aumentar en $96 - 50 = 46$ el número de ciclos y, por tanto, el rotor tendría que girar a razón de $30 \cdot 46 = 1380$ revoluciones por minuto. No hay necesidad de comprobar esta velocidad, ya que lo que interesa es que la frecuencia de la corriente sea precisamente doble de la velocidad de rotación del obturador, y esto se puede comprobar por método estroboscópico, según veremos después, y en caso preciso modificar ligeramente la velocidad del rotor, para

ajustar la frecuencia exactamente con la del obturador de modo que la frecuencia sea siempre doble de la velocidad del obturador.

Transformación de la corriente trifásica. La tensión procedente del cambiador de frecuencia es trifásica y su valor en voltios no es adecuado al funcionamiento de los arcos, ni se puede someter fácilmente a las variaciones de régimen de consumo que en su trabajo exige cada arco; por otra parte, se requiere tener un sistema independiente y

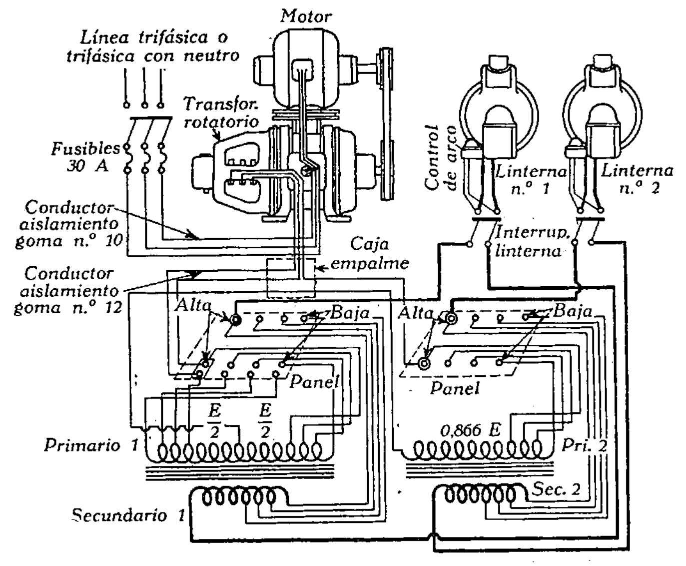


FIG. 85. Diagrama completo del sistema Cyclex

flexible para cada arco, y, finalmente, hace falta un medio complementario de la acción diferida del motor de avance de los carbones de modo que mantenga lo más instantáneamente posible su acción reguladora sobre la longitud del arco. Todas estas funciones se efectúan con relativa facilidad mediante las conexiones que se indican en el diagrama (fig. 85); en él se ve los tres hilos de salida de los anillos del rotor portadores de la corriente trifásica a 96 períodos por segundo y 85 V, conectados a dos transformadores especiales en cuanto a la forma de colocar sobre el núcleo los devanados, montados según el tipo Scott, lo que permite obtener corriente bifásica sobre sus dos devanados secundarios, reduciendo al mismo tiempo la tensión al valor aproximado de 20 V, necesaria para el trabajo de los arcos.

Esta conexión se logra, como se indica en la figura 86, llevando el extremo del primario de uno de los transformadores al centro del primario 1-2 del otro transformador, y los otros tres extremos libres al rotor del cambiador de frecuencia; los dos secundarios de corriente monofásica (pues una corriente bifásica es en el fondo monofásica) sirven cada uno para alimentar cada arco y su mecanismo de regu-

lación de avance de carbones, a través este último, de un transformador elevador auxiliar, según detallaremos después. Tanto los transformadores especiales como los de ajuste auxiliares llevan diversas tomas para la regulación a tensiones de la red entre 240 y 210 V.

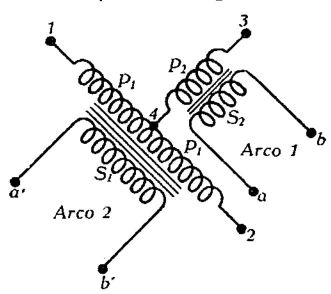


Fig. 86. Montaje Scott (transformación trifásica-bifásica)

Hemos dicho antes que los transformadores son especiales en cuanto a la forma de hacer sus devanados. Efectivamente, el núcleo de éstos es cerrado, con un brazo central sobre el que van los dos arrollamientos, pero no en la forma usual, sino uno en frente del otro, dejando entre ambos un pequeño entrehierro, el cual desempeña dos funciones importantes: de un lado hacer el transformador altamente inductivo, con el fin de que presente una gran resistencia a los cambios bruscos de tensión que, como consecuencia de la variación en la longitud del arco, se originen en su secundario, y de otro actuar como un regulador magnético complementario del mecanismo de avance de carbones; pero así como éste actúa por efecto de las variaciones de tensión del arco, aquél actúa sobre las variaciones de corriente, según veremos luego. Esta inductancia, relativamente elevada, permite una variación entre unos 35 V para la tensión en vacío, y unos 21 para la tensión con la carga del arco, lo que no podría lograrse con un transformador no inductivo, y constituye una reserva de voltaje para el caso de que aumente ligeramente la tensión de arco por un exceso de combustión de carbones que aumente su longitud.

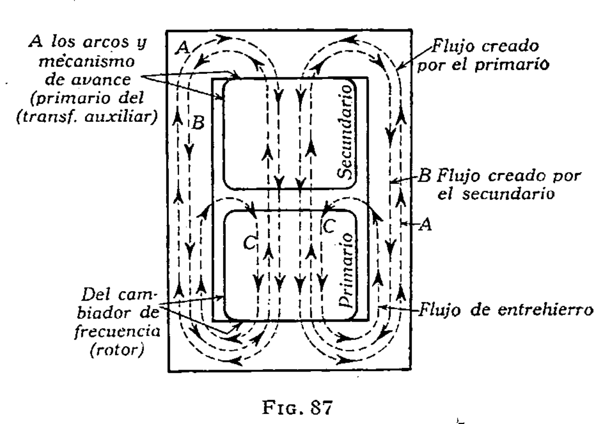


Fig. 87

Funciones de la compensación magnética del transformador. Se resumen de la siguiente manera:

a) Permite que la longitud normal del arco 3,92 mm (5/32″), pueda variar entre 12,7 mm (1/2″) y 4,3 mm (9/16″) sin apagarse ni cambio sensible en la iluminación de la pantalla.

b) Reduce los cambios bruscos de corriente que alimenta los arcos, eliminando así los cambios correlativos de la iluminación en la pantalla.

c) Permite, en los cambios de máquina de proyección, encender el segundo arco sin un efecto apreciable sobre la luz que envía sobre la pantalla el arco que estaba trabajando.

d) Actúa como un compensador magnético que coordina la velocidad de avance de los carbones con la longitud de arco.

Las tres primeras son una consecuencia inmediata del efecto de la impedancia del transformador y de la tensión en reserva que da la diferencia entre los 35 V de tensión en vacío y los 21 que necesita el arco para su funcionamiento normal; en cuanto a la última, vamos a indicar su manera de actuar. En la figura 87 se ve la distribución del flujo magnético creado por los dos devanados en el transformador; la bobina del primario crea un flujo cuyas líneas de fuerza en un instante dado están representadas por *A*, las cuales producen en el secundario la tensión eléctrica necesaria para el funcionamiento del arco. A su vez la corriente que circula por este secundario crea un segundo flujo *B* opuesto al anterior, que será tanto mayor cuanto más fuerte sea la corriente de arco. El transformador está diseñado de tal modo que una cierta cantidad del flujo creado por el primario se cierre *siempre* a través del entrehierro, tal como *C*. Ahora bien, si la corriente de arco aumenta por *disminuir* la longitud de éste, aumenta el flujo *B* creado por ella en oposición al *A*, y una parte de éste, mayor que antes, tendrá que cerrarse en el entrehierro, aumentando *C*; en consecuencia, disminuye *A* y, por tanto, la tensión inducida por *A* en el secundario. Esto lleva aparejado una *reducción automática en la corriente* de arco y en la tensión aplicada al mecanismo de avance de los carbones, que también se toma de este secundario; esta reducción convenientemente amplificada por el transformador elevador auxiliar, se aplica en el mecanismo de avance de los carbones al motor que desplaza éstos, y origina un descenso en su velocidad, lo que se traduce en una mayor separación de carbones, disminuyendo la corriente hasta que toma su valor normal.

Si, por el contrario, el arco aumenta de longitud, disminuye el consumo de corriente y, por consiguiente, el flujo *B* originado por ésta; entonces una parte del flujo *C* ya no se cerrará en el entrehierro, sino por el camino más fácil que sigue *A*, y, por tanto, aumentará el valor de este último, con lo cual aumentará la tensión y corriente en el secundario; de estos aumentos, el de la tensión se transmitirá al mecanismo de avance de carbones, que acelerará el motor y avanzará los carbones más aprisa, acortando su separación, y el de corriente se transmitirá al arco, continuando ambos efectos concordantes hasta que la corriente alcance con la separación de carbones su valor normal de trabajo. Se ve, pues, que se trata de un autorregulador que actúa a la vez sobre la tensión y sobre la corriente.

Mecanismo de avance de los carbones. Puesto que un incremento en la separación de carbones tiene como efecto una disminución en su corriente de alimentación y un aumento en la tensión de arco (medida entre los carbones), el solo efecto del transformador con induc-

tancia originada por el entrehierro entre devanados podría compensar tal incremento en la tensión de arco; pero su acción no es suficientemente rápida para mantener perfectamente uniforme aquella tensión, ya que se trata de una regulación diferida que se realiza solamente después que se ha producido la desviación del trabajo normal del arco; para acelerar su acción, al mismo tiempo que evita una atención continua del operador en la vigilancia del desgaste de carbones, se emplea

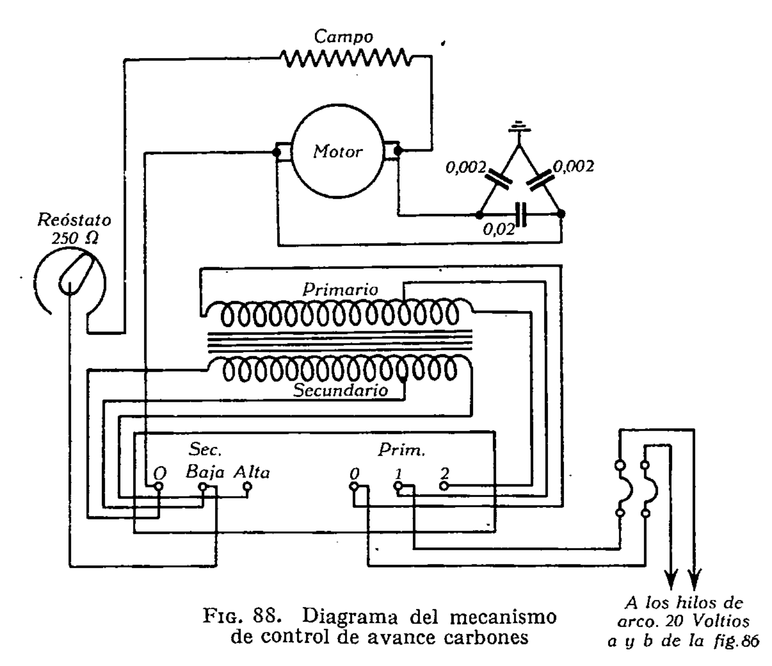


Fig. 88. Diagrama del mecanismo de control de avance carbones

un motor especialmente diseñado que al acercar o alejar dichos carbones completa de un modo casi instantáneo dicha función reguladora. Este motor trabaja en tales condiciones, que para que se produzca un cambio relativamente grande en su velocidad basta un ligerísimo cambio en el valor de la tensión a él aplicada; un cambio en la longitud del arco de sólo 1/16″ (1,6 mm) origina ya un aumento o disminución grande en el valor de su velocidad. Para ello, tal motor debe tener la menor fricción posible, lo que se consigue montando su rotor sobre cojinetes de bolas, y se acopla al mecanismo de avance de los carbones mediante engranajes de reducción de relación 60 000/1 (es decir, que por cada 60 000 revoluciones del motor, el eje de avance de los carbones sólo da una revolución), con lo que se consigue que el par resistente al motor sea prácticamente nulo, y su único trabajo se reduce a cambiar casi instantáneamente su velocidad según las variaciones más pequeñas de la tensión de arco. Para favorecer más aún esta acción, la tensión del secundario del transformador inductivo,

de que antes hemos hablado, no se conecta directamente al motor, como ya apuntamos antes, sino a través de un transformador elevador auxiliar en el que un ligero cambio en la tensión de arco se multiplica muchas veces en su secundario y se aplica desde éste al motor. Las conexiones desde la salida del secundario del transformador inductivo se ven en la figura 88.

Si, por ejemplo, se ha de trabajar a 60 A y 19 a 21 V, se seleccionan las tomas de los dos transformadores para obtener esas condiciones con la separación adecuada de carbones, y se ajusta con el reóstato de 250 Ω que se ve en la fig. 88, la velocidad del motor, según el régimen de consumo de los carbones. Una vez logrado esto y abandonado el arco al mando del mecanismo de avance, si, por una causa cualquiera, crece la longitud del arco, disminuye su consumo de corriente, lo que origina en el secundario del transformador Scott una disminución de flujo B y un aumento de flujo A, el cual produce un aumento de tensión en el secundario de tal transformador; este aumento de tensión origina, de una parte, un aumento en la corriente de arco y, de otra, un aumento en la velocidad del motor, con lo que los carbones se irán aproximando cada vez más, hasta que el arco adquiera su longitud adecuada en cuyo momento el flujo B crece y se restablece el valor normal de la corriente de manera muy rápida.

Ajuste del arco y naturaleza de los carbones. Los dos carbones son idénticos Suprex positivos de 7 mm por 14″ (35,5 cm) de longitud, cuyo consumo en las condiciones normales de trabajo que indicamos más adelante es de 28 a 35 mm cada 20 minutos, por carbón.

El ajuste de un arco de este tipo comprende tres aspectos:

a) Ajuste de los carbones (posición, tensión y corriente).

b) Ajuste del sistema colector de luz y color de ésta.

c) Ajuste de la frecuencia del transformador rotatorio; las dos primeras son corrientes en todos los tipos de arcos, pero la última es inherente a la naturaleza especial de este arco.

a) Existe una banda de corrientes con las que este arco trabaja en las mejores condiciones; por debajo de 52 A no es recomendable trabajar, porque el arco no es estable, teniendo tendencia a cambiar de posición la parte luminosa sobre la punta del arco, con un cambio correlativo constante en el color de la luz proyectada; por el contrario, corrientes por encima de 65 A producen un apuntamiento de los carbones, con cambios también en la coloración de la luz proyectada y todos los inconvenientes que hemos señalado ya en los otros tipos de arcos.

El espacio entre carbones que da los mejores resultados es de 4,8 milímetros (3/16″), pero esta longitud tiene un margen de variación que ya hemos indicado anteriormente. Si el arco se hace demasiado corto, resulta inestable y crítico, y si es demasiado largo, hay un derroche de energía y puede perderse calidad en la pantalla; de aquí resulta que habrá predeterminadas tensiones de arco para distintas corrientes: así, a 55 A la tensión es de 20 V; a 60 A, 21 aproximadamente, y

a 65 A, 22 V; en resumen: la corriente debe variar entre 58 y 62 A como valores extremos, y la tensión para una longitud correcta de arco, entre 21 y 22,5 V (fig. 89).

b) La distancia entre la apertura de proyección y el centro de la superficie plateada del espejo debe ser de 72 cm (28″) en este arco; esta distancia debe mantenerse siempre, porque un aumento en ella produce un aumento en el diámetro de la imagen del arco en la apertura, con la consiguiente pérdida de luz en la pantalla, y una disminución de la misma origina un decremento en ese mismo diámetro, con la consiguiente decoloración en los lados y bordes de la pantalla y una desigual iluminación de la misma.

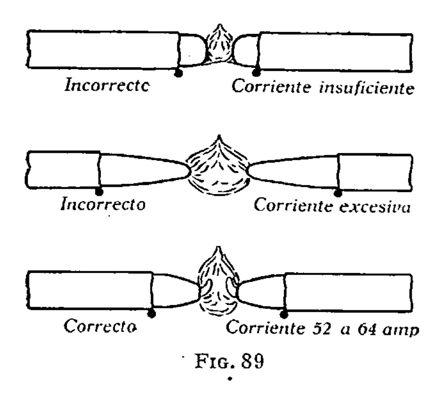


Fig. 89

Debe, además, procurarse una correcta alineación del arco con respecto a la apertura, para que el máximo de luz caiga sobre la pantalla; entre los distintos métodos propuestos, el mejor consiste, sin duda, en utilizar una varilla de acero que, pasando por los portacarbones y las guías de los mismos, venga a caer en el centro de la apertura; cuando no se dispone de la misma, se llevan los carbones a coincidir en sus puntas de modo que estén alineados perfectamente, se quitan los carbones sin mover los portacarbones y se observa a través del portacarbones posterior una luz colocada más allá de la apertura, con lo que será posible conocer si las mandíbulas de los portacarbones están alineadas con el centro de la apertura.

Por último, para obtener la mejor calidad en volumen y contenido de color de la iluminación en la pantalla, conviene recordar que aquélla depende de la distancia reflector-apertura, de que antes hemos hablado, y del enfoque exacto del arco; éste puede variar ligeramente de unos a otros espejos, pero una incorrecta posición del arco respecto al punto focal del espejo se traduce inmediatamente, sobre la iluminación de la pantalla, en un cambio en el color, el cual deberá ser blanco y no amarillo, ni azul. Para corregir este defecto eventual, se moverá todo el arco, con respecto al espejo, teniendo cuidado de no alterar la longitud de arco, ni tampoco la distancia espejo-apertura, hacia atrás o delante; cuando el arco está demasiado lejos del reflector, la luz en la pantalla es azulada, y cuando está demasiado cerca, amarillenta, y entre estas dos posiciones extremas se encuentra siempre una posición correcta con luz brillante y blanca, y esta posición se ajustará sobre la cartulina de observación que da la imagen del arco, entre las líneas marcadas al efecto en ella; esta operación habrá de repetirse varias veces, y debe comprobarse con una película en el crono y en marcha, antes de darla por definitiva.

c) Según dijimos antes, por método estroboscópico se comprueba fácilmente si la frecuencia del cambiador es la adecuada a la velocidad del crono y, por tanto, de la película. Basta iluminar con luz *exclusivamente* del arco (y no de la red industrial) uno de los rodillos de arrastre de la película: cuando la frecuencia de la corriente sea la correcta, se verán los dientes del rodillo estacionarios; si los dientes aparecen girando en el sentido de las manillas del reloj, el cambiador de frecuencia va demasiado despacio, si giran en sentido contrario, va demasiado de prisa; un ajuste en la polea de transmisión del movimiento del motor al cambiador permite poner en sincronismo la frecuencia de la corriente y la velocidad del obturador, que es el caso cuando los dientes están estacionarios.

V. La lámpara de filamento como foco de luz

Características de las lámparas de filamento como focos de proyección. El tamaño deseado y brillo de la imagen proyectada en la pantalla y las dimensiones de la apertura de la película o apertura del proyector (no del objetivo del mismo) a través de la cual la luz debe dirigirse, forman el punto de partida de todos los desarrollos de sistemas ópticos y focos incandescentes de luz dedicados a cine. La tabla I nos da los tipos más usuales en el mercado hasta 1935, en con-

TABLA I. **Clasificación de servicios de proyección (General Electric)**

Tamaño de la película y tipo de servicio	Ancho de la imagen. Oscilación en pies	Mín. de lúmenes aceptables en pantalla sin obturación	Máx. tamaño de la lámpara foco luz ([1])	Voltaje aconsejable para la lámpara	Designación		
					Tipo de lámpara	Tipo de filamento	Vatios
8 mm							
Amateur ...	1-2	5	T-8 ó S-11	100-120 V	T-8	C C 13	100
Hogar......	1-3	20	T-8 ó T-10	preferible, pero en todo caso los posibles de baja tensión	T-8	2 C C 8	200
					T-10	C C 13	200
16 mm						2 C C 8	300
Hogar......	3-6	50	T-8 ó T-10			C 13 D	400
Educativo y						C 13 D	500
negocios..	4-8	150	T-10 ó T-12	100-120	T-12	C 13 D	500
Local peq...	6-10	250	T-12	cualquiera		C 13 D	750
35 mm						C 13	500
Portátil-educativo y						C 13 D	750
						C 13	900
negocios..	8-12	300	T-20 corta	100-120	T-20	C 13	900
Semiportátil.						C13 D	1000
Locales medios	10-12	450	T-20 larga	100-120		C 13	1000
						C 13 D	1000
Teatros	10-20	800	T-24	cualquiera		C 13 D	1500
					Además existe la T-20 de 2100 W a 60 V y filamento C 13 D		

La *T* representa lámpara tubular, y el número, el diámetro en octavos de pulgada $\frac{1''}{8}$ = = 3,2 mm. La *S* representa lámpara esférica, y el número que sigue, el diámetro en igual medida = *Ligth center length*, es la distancia en pulgadas desde el centro del foco a la parte superior de la base, o de la aleta de esta base, si la tiene.

Tipos Standard's y dimensiones Americanas

Servicio: Tipo de proyector	Vistas fijas cine 8 y 16 mm	8 y 16 mm vistas fij.	Cine 8 y 16 mm	Vistas fijas cine 16 mm	Vistas fijas y cine 16 mm	Cine 16 mm	Cine 16 mm	Estereopticón cine portátil 35 mm	Cine portátil 35 mm. esteopticón	Cine portátil 35 mm	Estereopt. cine semiportátil 35 mm	Cine semiport. 35 mm estereopt.	Cine semiport. 35 mm estereopt.
Ventil. precisa	Natural	Natural	Moderadamente for.ª	Natural	Moderadamente for.ª	Forzada en alto grado	Forzada en alto grado	Natural	Moderante forzada	Forzada en alto grado	Natural	Natural	Moderante forzada
Watios	50	100	200	200	300	500	750	500	750	1000	1000	1000	1500
Voltios	100,105 110,115,120	100,105 110,115,120	100*	100,105 110,115,130	100,105 110,115,120	100*	100*	100,105 110,115,120	100*	100*	100,105 110,115,120	100*	100*
Ampolla	T-8	T-8	T-8	T-10	T-10	T-10	T-12	T-20	T-20	T-20	T-20	T-20	T-20
Zócalo	Bayoneta Candelabro	Bayoneta Candelabro	Bayoneta Candelabro	Prefoco medio	Prefoco medio	Prefoco medio	Prefoco medio	Prefoco medio	Prefoco medio	Prefoco medio	Prefoco Mogul	Prefoco Mogul	Biterminal
Horas medias de vida	50	50	25	50	25	25	25	50	25	25	50	25	25
Forma filamento	Monoplano	Monoplano	Monoplano	Monoplano	Monoplano	Biplano	Biplano	Monoplano	Biplano	Biplano	Monoplano	Biplano	Biplano
Salida inicial en lúmenes	790	1870	4500	4240	7050	12500	19500	13150	19500	27600	27000	27600	42750
Longitud total en pulgadas	$1\frac{3}{8}$	$1\frac{3}{8}$	$1\frac{3}{8}$	$2\frac{3}{16}$	$2\frac{3}{16}$	$2\frac{3}{16}$	$2\frac{3}{16}$	$2\frac{3}{16}$	$2\frac{3}{16}$	$2\frac{3}{16}$	$3\frac{7}{16}$	$3\frac{7}{16}$	4
Total máx. en pulg.	$3\frac{1}{8}$	$3\frac{1}{8}$	$3\frac{5}{8}$	$5\frac{3}{4}$	$5\frac{3}{4}$	$5\frac{3}{4}$	$5\frac{3}{4}$	$5\frac{3}{4}$	$5\frac{3}{4}$	$5\frac{3}{4}$	$9\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{2}$

junción con los tres tamaños de película a que se aplican. Se dan las condiciones prácticas que la experiencia ha mostrado más aconsejables en cuanto a la cantidad mínima de luz que se necesita en cada caso, juntamente con las limitaciones prácticas (de tamaño de la lámpara), y aspectos de trabajo. No se establecen los valores más deseables de salida de luz a la pantalla, pero los máximos valores aceptables en cada caso son varias veces el valor mínimo indicado.

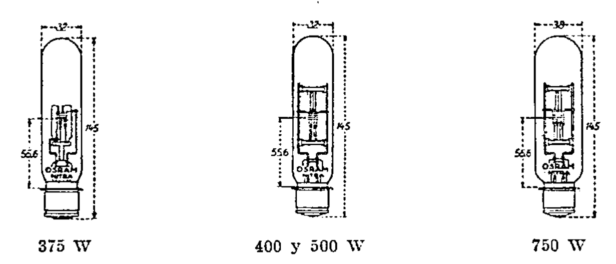
Lámparas europeas. Los datos dados anteriormente se refieren casi exclusivamente a lámparas de filamento incandescente americanas; sin embargo, muchos usuarios disponen de aparatos provistos de lámparas europeas, fabricadas casi exclusivamente por la casa Osram; tiene, pues, interés dar en forma de tablas las características de estas lámparas, con el fin de poder reemplazarlas cuando ello sea posible. En las páginas 104, 105 y 106, damos tales tablas con indicación de los aparatos en que se utilizan más corrientemente:

OSRAM-CINE PELÍCULA 8 mm

para aparatos: Agfa, Kinox, Kodak, Kodatoy, Pathé, Víctor, etc.

Servicio: 30-60 horas.

Los aparatos de Cine familiar necesitan lámparas especiales de elevada intensidad, tamaño reducido y filamento concentrado.



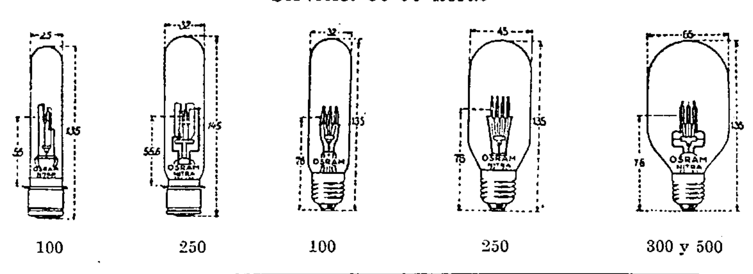
375 W — 400 y 500 W — 750 W

Tensión Voltios	Consumo Watios	Dimensiones Diámetro mm	Dimensiones Altura mm	Tamaño del cuerpo luminoso	Para aparatos
12	0,5 A	15	60	35	Pathé Baby
60	0,83 A	24	80	56	Pathé Lux O
80	1,25 A	24	96		Pathé Lux S
80	2,00 A	24	107,5		Pathé Lux SS
6	4,35 A	35	65		Kinox
12	8,00 A	60	90		—
100	50 W	26	76		Kodatoy
75	375 W	32	145	55,6	Agfa y Víctor
110	400 W				Kodak
	500 W				
	750 W	38			

OSRAM-CINE de película 16 mm

para aparatos Agfa, Bell y Howell, Bolex, Kodak, Zeiss-Ikon, etc.

Servicio: 50-60 horas



100 250 100 250 300 y 500

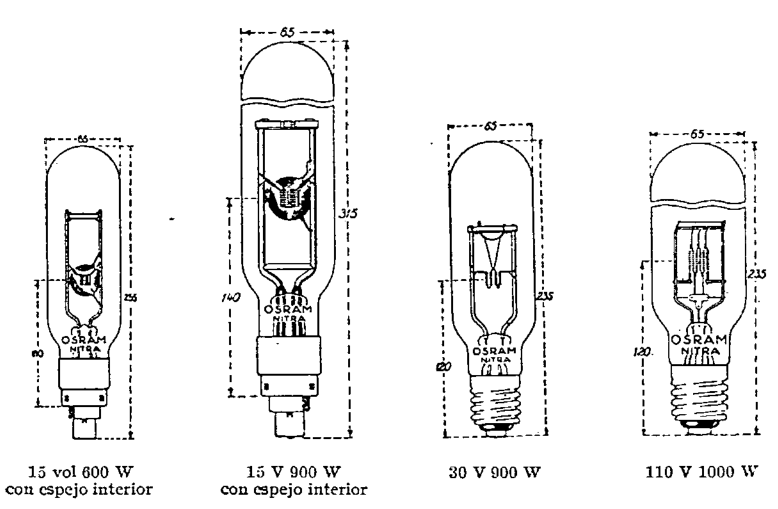
Tensión Voltios	Consumo Watios	Flujo luminoso aproximado en lúmenes	Superficie aproximada del cuerpo luminoso en mm
30	100	2300	4,6 × 4,6
60		2000	4,5 × 4,7
100-160		1790	5,5 × 5,5
200-230		1650	10,0 × 7,0
50	250	6000	8,0 × 7,4
100-160		5400	8,0 × 8,0

Rendimiento de lámparas de filamento para focos de cine. Para muchas clases de trabajos industriales con película de 16 mm y en locales pequeños o con equipos semiportátiles, el sistema de proyección (excluída la lámpara que en película substandard casi siempre reemplaza al arco) y el tamaño de la pantalla son fijos, de modo que si se desea un incremento en la iluminación de la pantalla, debe obtenerse por algún procedimiento que generalmente consiste en emplear una lámpara más poderosa, o en modificar las condiciones de trabajo de la ya existente. Evidentemente, la primera alternativa da una solución, pero, además, se puede obtener el incremento de iluminación mediante un incremento en el voltaje de alimentación de la lámpara; la figura 90 nos da una representación aproximada del aumento o disminución del flujo de luz en %, con la tensión en % por encima o por debajo de su tensión normal; en la misma figura se ha representado también para iguales variaciones de tensión el aumento o disminución en % de la vida normal de la lámpara a su tensión normal. Ambas curvas deben encontrarse precisamente en el punto que corresponde a la tensión para que ha sido diseñada la lámpara, y se observa que una reducción de la tensión lleva consigo una disminución en el flujo de luz y un aumento en la vida de la lámpara; lo inverso sucede para tensiones superiores a la normal de trabajo.

Cuando para aumentar el flujo de luz se aumenta la tensión de trabajo, la vida de la lámpara se reduce en una cierta proporción; pero

OSRAM-CINE de película 35 mm

Servicio: 100 horas



15 vol 600 W con espejo interior — 15 V 900 W con espejo interior — 30 V 900 W — 110 V 1000 W

Tensión Voltios	Consumo Watios	Flujo luminoso Lúmenes	Superficie aproximada del cuerpo luminoso en mm	Anchura máxima de la imagen [1] aprox. en m	Densidad luminosa aprox. en lux
100-160	100	1 620	7 × 6	2,50	20
200-230		1 370	11 × 8,6		
100-160	250	5 050	10 × 10	3,50	
200-230		4 440	12 × 10,5	3,00	
100-160	500	11 100	12 × 9	4,00	40
100-160	1000	24 400	15 × 13	4,50	
30	100	2 020	6 × 4	3,00	20
	300	7 200	9 × 6	3,75	40
	900	25 200	12 × 10	4,50	
15	600	16 200	9 × 10		60
	600	Con espejo int.	9 × 10	5,00	
	900		10,5 × 10,9	5,75	

[1] Los valores citados de anchura de la imagen se obtienen con el aprovechamiento más favorable de la óptica en las intensidades lumínicas indicadas.

tal acortamiento puede ser ventajoso en algunos casos y quedar compensado por el aumento de iluminación y el consumo. Recíprocamente, si se utiliza un potente proyector para imágenes relativamente pequeñas, se puede lograr una economía trabajando la lámpara de proyección por debajo de su voltaje normal. Estas relaciones se muestran muy sencillamente en la figura 91. Las curvas que representan el porcentaje de tensión en función del coste expresado en lámpara-

hora (el precio por hora de trabajo de la lámpara), deben emplearse en unión de las tablas que las acompañan, porque el precio de la lámpara no guarda relación con la luz emitida o la vida de la lámpara. Estas curvas requieren un cuidadoso estudio, ya que se puede deducir de ellas lo extraordinariamente económico que es emplear proyectores de alto voltaje a un voltaje más pequeño que el normal o típico que le corresponde. Por ejemplo: una lámpara de proyección de 1000 W al 90 por ciento de su voltaje, entrega el 68 por ciento de luz en la pantalla, a un coste de 10 céntimos de dólar por hora (convencionalmente se toma como el 100 por ciento el brillo que lanza sobre la pantalla la lámpara de 1000 Watios, a su voltaje normal). Para obtener la misma intensidad de luz con una lámpara de 750 W, esta lámpara debe trabajar al 99 % de su voltaje nor-

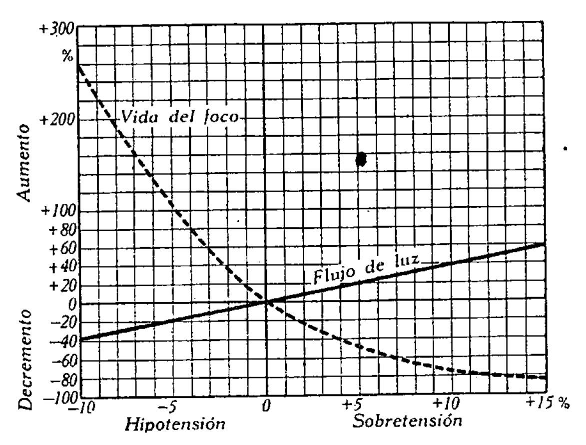
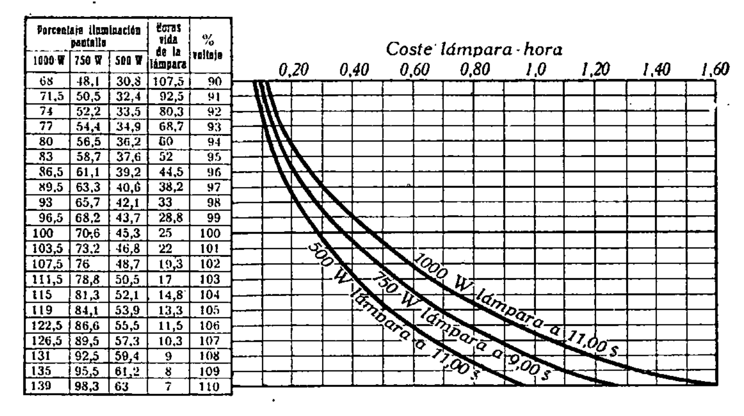


Fig. 90



Porcentaje iluminación pantalla			Horas vida de la lámpara	% voltaje
1000 W	750 W	500 W		
68	48,1	30,8	107,5	90
71,5	50,5	32,4	92,5	91
74	52,2	33,5	80,3	92
77	54,4	34,9	68,7	93
80	56,5	36,2	60	94
83	58,7	37,6	52	95
86,5	61,1	39,2	44,5	96
89,5	63,3	40,6	38,2	97
93	65,7	42,1	33	98
96,5	68,2	43,7	28,8	99
100	70,6	45,3	25	100
103,5	73,2	46,8	22	101
107,5	76	48,7	19,3	102
111,5	78,8	50,5	17	103
115	81,3	52,1	14,8	104
119	84,1	53,9	13,3	105
122,5	86,6	55,5	11,5	106
126,5	89,5	57,3	10,3	107
131	92,5	59,4	9	108
135	95,5	61,2	8	109
139	98,3	63	7	110

Fig. 91

mal y a un coste de 22 céntimos por hora. Aun trabajando la lámpara de 750 W al 10 % de sobrecarga, es decir, al 110 % de voltaje, la iluminación en la pantalla es todavía ligeramente inferior que con la lámpara de 1000 W trabajando a su tensión normal, y el coste es de 1,13 $ comparado con 0,43 que corresponde a la de 1000 W. Sin em-

bargo, si sólo se dispone de lámparas de 750 W, es interesante saber en qué condiciones se puede obtener una iluminación equivalente a la de 1000 w. Si la lámpara se sobrecarga sólo por períodos más cortos que la vida total de la lámpara, el coste comparativamente puede ser menor, porque aquellas cifras están dadas, naturalmente, bajo el supuesto de que la lámpara trabaja durante todas sus horas de vida a la tensión indicada.

Es bien evidente que la iluminación en la pantalla, para un crono dado, varía entre límites muy amplios según la combinación que se utilice, de lámpara y objetivo, y prácticamente todos los proyectores comerciales de 16 mm se construyen de modo que ambos elementos sean intercambiables. Estas tablas, no obstante, representan un valor relativo, ya que el objetivo empleado en el crono tiene una importancia decisiva sobre la iluminación de la pantalla. Cuando estudiemos la iluminación de la pantalla veremos que es posible establecer las normas de dicha iluminación, con las cuales se está en mejor postura para la utilización adecuada de dichas curvas y tablas.

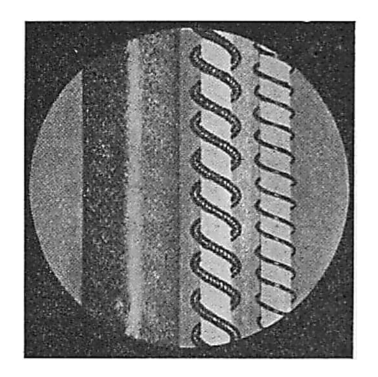


Fig. 92

El brillo en los focos de filamento. El objetivo fundamental de los focos incandescentes es lograr la máxima salida de luz posible, compatible con el espacio útil permitido en ampollas de tamaño factible, coste aceptable y perfecta ejecución.

El brillo de tales focos depende de dos cosas: la temperatura de trabajo del filamento y la cantidad de filamento incandescente que puede disponerse en la unidad de área. La temperatura del filamento y, por consiguiente, la cantidad de luz y brillo crecen rápidamente cuanto menor es la vida para la que la lámpara ha sido diseñada. Para una determinada vida de la lámpara, la temperatura del filamento puede aumentarse por el uso de filamento más grueso; lo que significa o bien un incremento de vatiaje o bien un aumento de corriente y reducción de la tensión si aquél se quiere mantener. Hay un límite más allá del cual una disminución de tensión y un aumento de corriente es desventajoso, debido a las grandes pérdidas en los conductores de conexión del filamento en la lámpara.

La cantidad de filamento incandescente que se puede depositar en la unidad de área depende, además del diámetro, de la construcción del filamento empleado. El filamento puede concentrarse mediante arrollamiento en hélice, y de hecho estos arrollamientos pueden volver a arrollarse en hélice sobre un segundo mandril, formando una mayor concentración; la figura 92 representa a escala aumentada y

con mayor paso de hélice, el aspecto de ambos arrollamientos. A su vez, estas hélices pueden disponerse en más de un plano, para llenar los espacios vacíos que de otra manera presentarían a los objetivos, y esta construcción responde a las denominaciones de *monoplana* y

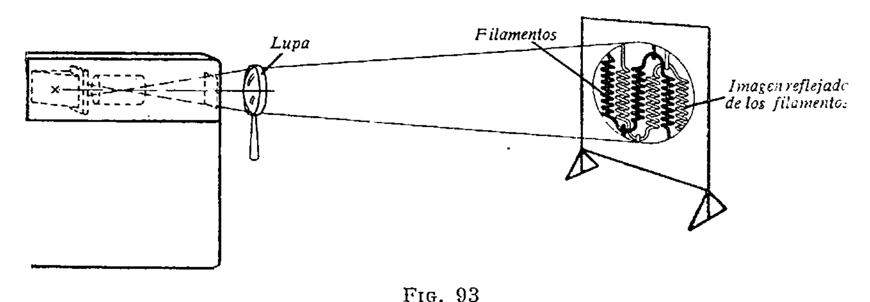


Fig. 93

biplana de algunas lámparas; tales construcciones se han hecho posibles gracias a los métodos de tratamiento térmico de filamentos, puestos en práctica desde hace pocos años, además de un sistema de montaje de estas hélices mediante resortes para evitar las grandes tensiones

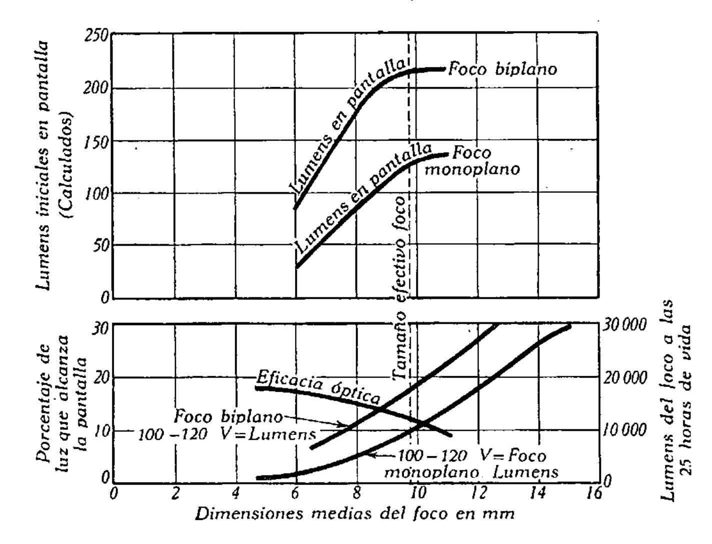


Fig. 94. Efecto de eficacia óptica en la iluminación inicial de la pantalla para lámparas monoplana y biplanas (sistema condensador esférico, típico en 16 mm y objetivo de proyección $f/2{,}0$)

que se producen por caldeo y enfriamiento, con lo que su posición se mantiene durante todo el período de vida de la lámpara.

La concentración de filamento lleva consigo la pérdida de eficacia en la producción de luz, puesto que la temperatura en los distintos

puntos de filamento no es uniforme; el punto más caliente es el que determina la vida de la lámpara, mientras que el flujo total de luz depende de la temperatura media. La relación de la máxima temperatura a la temperatura media es mayor para el filamento de doble hélice que para hélice sencilla, y todavía más para lámparas biplanas, que tienen el más bajo rendimiento en generación de luz, aunque no en cantidad o utilización.

El uso de un espejo esférico detrás del filamento es importante porque produce un foco más uniformemente brillante y, por consiguiente, aumenta el brillo medio del foco; este aumento no es evidentemente el mismo para todos los tipos de construcción, puesto que varía en la misma medida que los espacios vacíos son cubiertos por las imágenes reflejadas (fig. 93).

En la práctica, el brillo efectivo de focos monoplanos de hélice simple se aumenta por el uso de espejo en más del 45 %; para los monoplanos de hélice doble, en el 35 % aproximadamente, y para los biplanos nunca excede del 30 %.

Gran parte del calor y luz reflejadas por el espejo es interceptada por el filamento, lo que aumenta su temperatura; ello significa un mayor flujo de luz para un vatiaje dado. Desgraciadamente, aumenta también la disparidad entre la temperatura máxima y la media, de tal modo que ambos factores deben ser tenidos muy en cuenta en el diseño de la lámpara.

TABLA II. **General Electric, de flujo de luz por unidad de área**

Foco	Vatios	Voltios	Dimensiones medias en mm del foco	Horas de vida	Bujías mm² (¹)
Monoplana CC13	200	100/120	7,8 × 8,1	50	10,2
» 2 Seg CC8	200	100/120	5,9 × 6,0	25	16,5
» C13	500	100/120	13,0 × 12,0	50	13,5
» C13	500	100/120	10,4 × 10,0	25	20,2
» C13	500	30	9,8 × 9,2	50	23,9
» C13	500	30	8,6 × 8,3	25	31,2
» C13	900	30	10,7 × 13,8	100	27,6
Biplana C13D	500	100/120	8,2 × 8,2	25	30,8
» C13D	750	100/120	9,3 × 9,9	25	34,9
» C13D	1000	100/120	11,0 × 12,1	25	35,2

(¹) Estos valores son válidos cuando se usa un espejo esférico y son valores medios sobre un ángulo de 100°.

El efecto neto de cada uno de los factores sobre el brillo se ve en los datos de la tabla americana anterior, para las formas del foco en general más ventajosas; se ve, también, que las ventajas de tensiones bajas difícilmente compensan la desventaja del peso y coste adicional del equipo auxiliar cuando se trata de equipos o proyectores portátiles, pero sí tienen ventaja en tales proyectores en cuanto se refiere a horas de vida, ya que, en primer lugar, se obtiene un alto

brillo en la pantalla, y cuando el trabajo es intermitente, la duración llega a ser larga; en instalaciones fijas y teatros con servicio continuo, el factor más importante es la vida de la lámpara.

Las partes del foco que están más cerca del eje óptico son más eficazmente utilizadas que las que están lejanas, y la parte inferior de la figura 94 muestra, como resultado de pruebas con focos de diversos tamaños, el % de lúmenes engendrados que alcanza la pantalla (eficacia óptica) frente a las dimensiones del foco.

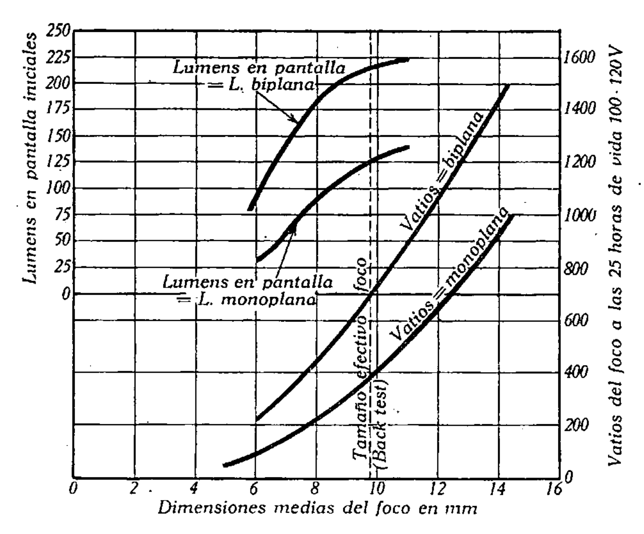


FIG. 95. Relación de la iluminación inicial en pantalla al vatiaje para focos monoplano y biplano (Condensador esférico típico para 16 mm con objetivo $f/2{,}0$)

Aun cuando los datos se refieren a proyectores de 16 mm con sistema condensador esférico y objetivos de abertura $f/2$, las mismas relaciones se mantienen para otros sistemas ópticos.

Para estos sistemas, la prueba hacia atrás, de que hablaremos en *El colector de luz* (Capítulo VI), da unas dimensiones de 9,8 que ha sido representada en la figura. Se observa que las curvas lúmenes en pantalla continúan creciendo para focos de mayor diámetro que 9,8, lo que demuestra el hecho de que las partes marginales del foco están más frías que el centro, y que, por consiguiente, un foco de dimensiones actuales un poco más grandes añade más luz a la pantalla por elevar el brillo medio de la parte utilizada.

Limitaciones del vatiaje respecto a la ampolla y precio de coste. Hasta ahora hemos considerado la dependencia del vatiaje con las características del foco, pero cuando se trata de utilizar esos datos para la mejor elección de una lámpara para un servicio dado, en-

tran en consideración otros factores como las limitaciones de la ampolla y el coste de la misma.

Si llevamos el vatiaje en función del tamaño del foco, como en la figura 95, se observa que para estos tipos de equipos el foco que produce la máxima iluminación en la pantalla es el que consume 750 W para el tamaño efectivo del foco. Se ha diseñado un particular sistema óptico, de tal modo que la distancia foco-condensador requiere el uso de lámparas de filamento centrado como la T-10, o de ampollas con filamento excéntrico pero de más grande tamaño, lo cual introduce problemas de ennegrecimiento y temperatura de la ampolla.

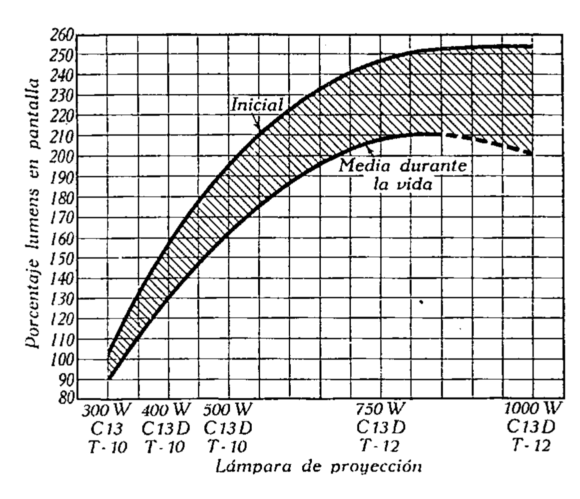


FIG. 95 bis. Iluminación relativa de pantalla de sistemas ópticos típicos para distintas lámparas 16 mm

El vatiaje límite para cada tamaño de la ampolla depende de la temperatura a la cual la ampolla devitrifica, se ablanda o le salen vejigas, la cual varía con el vidrio empleado; los factores que determinan esa temperatura son el tamaño de la ampolla y la mínima distancia entre el filamento y la ampolla, particularmente este último. De aquí resulta que una lámpara con gran ampolla y filamento excéntrico permite menos ganancia en vatiaje que una lámpara de filamento centrado en ampolla que resista altas temperaturas.

El tamaño de la ampolla es importante desde el punto de vista del ennegrecimiento y de la temperatura de fusión causada por la radiación absorbida, la cual puede ser elevada hasta un 30 % en casos extremos; una buena ventilación puede hacer mucho en tal sentido, pero ello tiene un límite debido a que la concentración de ennegrecimiento producida por el filamento se realiza sin tener en cuenta el volumen de aire.

La evaluación de la salida media de luz a lo largo de su vida, en la elección de una lámpara, es de más interés que los lúmenes en pantalla iniciales de la misma, y su período de ennegrecimiento es también un factor a tomar en cuenta. A título de ejemplo, la figura 95 bis muestra que para una ampolla dada, un vatiaje más bajo que aquel que da la mayor iluminación inicial de pantalla ofrece a menudo un mejor valor medio.

Un análisis de varios casos ha conducido a la siguiente práctica:

Tamaño de la ampolla	*Vatiaje máximo*
T-8	200
T-10	500
T-12	750
T-20 (corta)	1000
T-20 (larga)	1500
T-24	2500

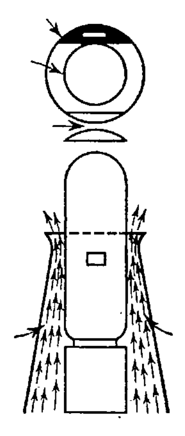


Fig. 96

Los vidrios empleados en las lámparas (Pirex, que resisten temperaturas intermitentes de 550° a 600° F) y los sistemas de ventilación en los modernos proyectores, han permitido que el vatiaje total se concentre en el espacio que es efectivo para la iluminación en la pantalla, con una ampolla de tamaño aceptable.

En cuanto a la ventilación, se puede recurrir muchas veces a una ventilación forzada; pero a menudo el ruido de los inyectores o sopladores de aire, o una excesiva velocidad de los mismos, plantea serios problemas, habiéndose encontrado como solución más satisfactoria la de la figura 96, ya que en la parte más caliente de la lámpara es donde el aire se mueve a más velocidad con este sistema.

Las tablas que damos anteriormente nos indican, además, para qué ancho de película son adecuadas.

VI. El colector de luz

Como ya hemos dicho, el conjunto de todos los elementos destinados a recoger la mayor cantidad de flujo de luz procedente del foco y concentrarlo en la apertura del crono, recibe el nombre de sistema colector. Esencialmente existen dos tipos de sistemas colectores: el *reflector* y el *refractivo o condensador;* el primero utiliza un espejo, a veces ayudado de una lente delante de la apertura, llamada por ello *lente de apertura* o de campo, mientras que el sistema refractivo emplea sistemas de lentes o condensadores auxiliados o no por la lente de apertura.

Sistema reflector

Es casi exclusivamente usado en España y consiste, como se aprecia en las figuras 54 y 55, en un espejo cóncavo que lleva un pequeño taladro en su centro de figura, o a veces excéntrico, por donde penetra uno de los carbones del arco (1); este espejo va sujeto a una armadura y lleva una serie de mandos, que le permite tomar ligeras inclinaciones, vertical y horizontalmente, los cuales consienten llevar la imagen del foco a la apertura del crono. Existen tres tipos de espejos empleados en proyección: los *esféricos*, que son los más corrientes por su menor precio, los *elípticos* y los *parabólicos;* estos últimos necesitan trabajar siempre en unión de un sistema de lentes que concentre el haz paralelo a que dan lugar, haciéndolo convergente sobre la apertura.

Para los espejos *esféricos*, según las leyes que dimos al ocuparnos de éstos, los dos factores que gobiernan la posición y tamaño de la imagen del foco son, la distancia focal del espejo (o bien el radio de la esfera a que pertenece, ya que $f = R/2$), y la distancia a que se encuentra la imagen de su vértice, o, lo que es equivalente, la distancia espejo-apertura. Se comprende después de lo dicho allí, y teniendo en cuenta que la imagen del foco dada por el espejo debe cubrir totalmente la apertura, que la imagen deberá ser mayor que el objeto,

---

(1) En España, es muy raro el uso de arcos de proyección con negativo inclinado, pero no así en América.

y, por tanto, éste, o sea el cráter, debe encontrarse entre el foco y el centro de curvatura del espejo y relativamente cerca del foco; para conseguir tal cosa y ajustar dentro de límites suficientes esa posición, todo el conjunto del arco formado por los dos carbones puede desplazarse a lo largo del eje principal del espejo por medio de tornillos moleteados, llevándolo a la posición más ventajosa. Es claro que después de lo dicho, la apertura del crono se encontrará muy próxima a la imagen conjugada del cráter y que, por tanto, la posición de esa apertura con relación al espejo también es determinada dentro de estrechos límites una vez elegido el reflector.

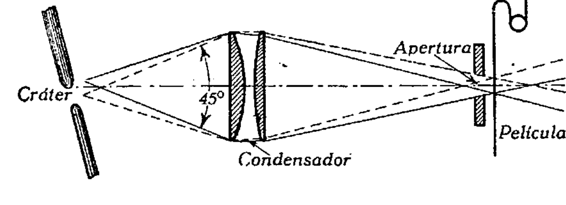


FIG. 97

El diámetro de estos espejos no excede casi nunca de los 200 mm debido a que la aberración esférica y el astigmatismo toman fuertes valores cuando se aumenta la abertura; de aquí que sólo se usen en arcos antiguos de baja intensidad y que su rendimiento sea pequeño; la disposición de los elementos es la misma que se señala en la figura 54 para los elípticos, pero el ángulo marcado allí con 120° es mucho menor, aunque mayor que 45° que correspondía al primitivo colector refractivo (figura 97). El carbón positivo tiene su cráter dirigido al espejo de modo que toda la luz que salga de él pueda chocar en el reflector y alcanzar después de la reflexión la apertura de proyección. Prácticamente estos reflectores están llamados a desaparecer en arcos de proyección. La ventaja del reflector respecto a la luz directa del cráter se ve en seguida si se tiene en cuenta esta consideración elemental; si sólo utilizáramos el foco de luz, supuesto puntual, de todo el flujo que radia el foco, sólo sería verdaderamente activo, a los fines de iluminación de la apertura, el comprendido dentro del cono de luz de centro en el cráter del arco y de base en la apertura, mientras que utilizando el reflector, no sólo este cono, sino todo el comprendido dentro del ángulo de base en el contorno del espejo incide después de la reflexión en la apertura, el cual antes se perdía por completo.

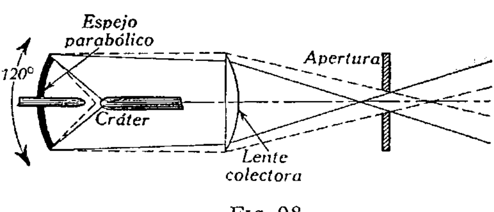


FIG. 98

Para aumentar el ángulo útil se precisa aumentar el ángulo en el centro abrazado por el casquete esférico, pero esto tiene los inconvenientes de que antes hemos hablado, con lo que sólo será posible utili-

zar una pequeña fracción del flujo total que sale del cráter del carbón positivo.

Espejos parabólicos. Están fundados en la propiedad que tiene la parábola de que todos los rayos que parten de su punto focal salen después de reflejados paralelos a su eje (fig. 98); necesitan, por tanto, un lente o sistema de lentes condensador que recoja el haz paralelo y lo concentre en la apertura de proyección; carece de astigmatismo, y, por tanto, sus imágenes son más fieles que en los esféricos; el ángulo de abertura puede hacerse, por tanto, mayor que en los esféricos, con lo que se aprovecha mayor cono de luz, que alcanza sensiblemente el valor de 120°, hallándose limitado por la abertura del sistema condensador, que no puede hacerse excesivamente grande, so pena de elevar grandemente su precio; la posición de los carbones es sensiblemente la misma que en los esféricos, con el cráter del positivo de cara al espejo y en el punto focal de la parábola. Son menos corrientes que los elípticos, pero más usados que los esféricos, sobre todo en arcos de mediano y alto rendimiento y en alta intensidad.

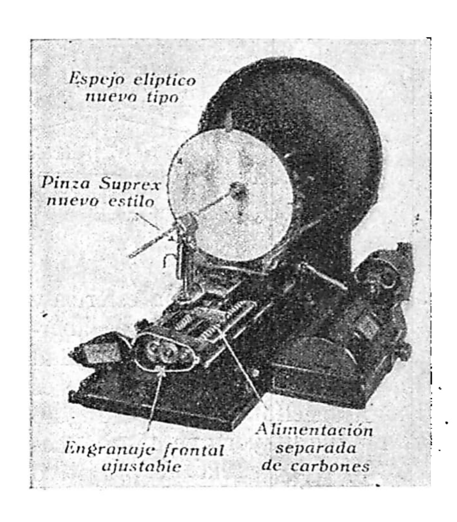


FIG. 99. Colector de espejo elíptico Peerless con arco entretenido mediante motor 30 voltios con cambio de marchas según tipo y consumo carbones

Espejos elípticos. Son los más empleados en arcos de mediano y alto rendimiento, y se fundan también en la propiedad geométrica de la elipse de que todo rayo que sale de uno de sus puntos focales después de reflejarse en el espejo, viene a pasar por el segundo punto focal de la elipse. En esta clase de reflectores, la posición relativa de los carbones es la misma que en los esféricos y parabólicos, pero el cráter del carbón positivo está sensiblemente en el punto focal más próximo al casquete que constituye el espejo, y la apertura de proyección se encuentra en el otro punto focal, por lo que la distancia espejo-apertura depende de la excentricidad de la elipse; son también estigmáticos, es decir, sin astigmatismo, lo mismo que los parabólicos, y, por tanto, tienen en este aspecto iguales ventajas que aquéllos y el ángulo de abertura suele ser de unos 120°, aunque algunos, como los de Bausch & Lomb de 350 mm de diámetro, empleados en las linternas Suprex Ashcraft tipo E de alta intensidad, llegan hasta 140° con un aumento lateral para la imagen de 6,8 a 1. Se emplean en arcos de alta y baja

intensidad y la figura 54 da diagramáticamente una idea de los mismos. La distancia espejo-apertura es para dicha linterna de unas 33″ (84 mm). La figura 99 muestra un arco de linterna de baja intensidad Peerless con carbones Suprex y espejo elíptico, modificada para trabajar en alta.

Aun cuando el aumento para estos espejos elípticos suele ser de 6 a 1, lo que limita el ángulo a 120°, el uso de objetivos de proyección de gran luminosidad y que admite, por tanto, conos de luz más abiertos, ha permitido, sin embargo, reducir ese aumento a 4,5/1, con lo que se consigue aumentar el ángulo del espejo y el brillo en la apertura. Véase lo dicho a este respecto al tratar de los carbones SRA en el estudio del foco de luz *Carbones de baja intensidad y gran carga.*

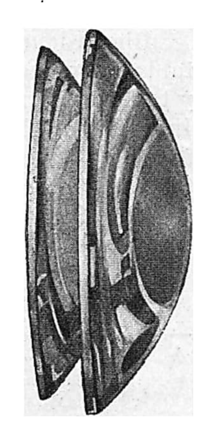


FIG. 100. Colector-condensador para arco formado por dos lentes plano-convexas de 200 mm (8″) de diámetro y 47,5 (19″) de distancia focal

Colectores refractarios

Son los primeros en orden cronológico; y la figura 97 da una idea del tipo más antiguo de colector de este tipo; en la figura se ve cuál es la posición aproximada de los carbones y también que el cono de luz activo no solía pasar de los 45°, por lo que su eficacia era relativamente pequeña; modernamente, este tipo de colectores, muy mejorado, se emplea en arcos de alta intensidad, pero el sistema de lentes (fig. 67) tiene ahora una rapidez de *f*/2,3, por lo que pueden recoger los rayos dentro de un haz de gran abertura, y su eficacia es muy grande, ya que, como veremos al hablar de objetivos, el flujo que lo atraviesa es inversamente proporcional al cuadrado del número *f*/*n*; además, las lentes componentes se encuentran corregidas de aberraciones especialmente cromáticas, y sin coloración en los bordes, lo que las hace muy eficaces. Por último, estas lentes están trabajadas en algunos casos según superficies especiales que dan, con gran abertura, imágenes muy fieles, y que aunque caras, son de mucho valor para obtener una imagen muy brillante; tales lentes o sistemas se llaman *asféricos* (fig. 100).

Como se observa en la figura 67, los carbones no están opuestos en estos sistemas, sino inclinados; el positivo, normal al plano de la apertura y con el cráter dirigido hacia el condensador, o sea, opuesto a la posición que tiene en los reflectores de espejo.

En estos colectores, el arco y la apertura deben encontrarse sensiblemente en la posición de focos conjugados, y como además la imagen ha de ser algo mayor que el objeto que aquí también es el cráter del arco, del estudio hecho en las lentes se deduce que el cráter debe encontrarse entre *f* y 2*f* y muy cerca de *f*, para que la imagen en la

apertura sea real y ligeramente superior en tamaño al cráter del arco, aun cuando ello requiere un estudio más detallado.

Las lentes que lo componen suelen ser dos, a veces más, planoconvexas esféricas o asféricas para que estén mejor corregidas de sus aberraciones, ya que han de tener una gran abertura; su diámetro es muy variable: oscila entre 75 mm y 30 cm, y su distancia focal equivalente entre 10 y 60 cm, como los empleados en las linternas Peerless, Zeiss-Ikon, Motiograph, etc.

Dimensiones características en colectores de espejo Zeiss-Ikon. La tabla que damos a continuación muestra las características de distancia y tamaños correspondientes a los arcos y sistemas colectores de Zeiss-Ikon más utilizados en nuestro país. De los dos números escritos en forma de fracción, el primero indica el diámetro y el segundo la distancia focal expresados en milímetros, que es la manera de expresar la inversa $\frac{1}{n}$ de la abertura, por los alemanes.

ZEISS: **Tabla de distancias colector-apertura**

Lámpara de arco	Distancia en cm para las intensidades de corriente continua en amperios que se indican							
	10	15	20	25	30	35	45	75
Distancia del condensador a la apertura								
Arco ASTISOL, con reflector parabólico 200/75 y condensador 200/500	—	48	45	—	—	—	—	—
ARTISOL, reflector parabólico 250/110, condensador 250/600.	—	—	—	55	50	—	—	—
ARTISOL, parabólico 250/110, condensador 250/500	—	—	—	—	—	50	45	—
ARTISOL 75, parabólico 250/110 condensador 250/600	—	—	—	—	—	—	—	55
Distancia vértice espejo a la apertura								
ERNESOL, con espejo esférico 170 ó 200/85	60	55	50	—	—	—	—	—
KINESOL ó ERNESOL, con espejo asférico 200/75	68	66	64	—	—	—	—	—
KINESOL, con espejo asférico 250/110	—	—	70	68	66	64	—	—

En todos ellos se observa, como es natural, que a medida que aumenta la intensidad de corriente en el arco y, por consiguiente, el tamaño del foco, va disminuyendo, para el mismo tipo de arco, la distancia entre condensador y apertura, o entre espejo y apertura, lo que era de esperar, según dijimos anteriormente, ya que la imagen

cubre mejor la apertura sin tanto aumento y, por consiguiente, hay que acercar la apertura al condensador o espejo, con todos los demás elementos del colector de luz, para obtener más brillo en la apertura.

Sistemas ópticos con condensador. Distancia colector-apertura. La longitud focal y abertura relativa (f/n) del objetivo de proyección suelen estar bien establecidas para cada tamaño (apertura) de película empleada. Aumentando la abertura relativa de un objetivo, es posible una mayor iluminación en la pantalla, porque, según se sabe, la cantidad de luz o flujo que pasa por el objetivo es inversamente proporcional al cuadrado de la abertura relativa n. En el caso de película de 35 mm el valor $f/2$ es el límite empleado en América, mientras que en Europa se llega hasta $f/1,9$, aunque recientemente también allí se llega a este valor. En el caso de películas de 8 y 16 mm también se emplean generalmente $f/2$ con buenos resultados, pero el valor $f/1,6$ se impone cada vez más, como más adecuado.

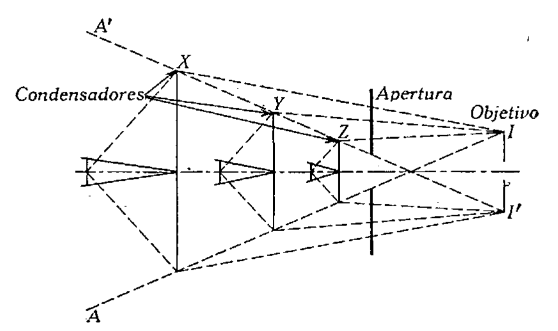


FIG. 101. Relación entre el diámetro del condensador y la distancia condensador-apertura, para iluminación uniforme de la pantalla

Si el objetivo de proyección debe transmitir la mayor cantidad de luz, la imagen del foco dada por el colector debe llenar por completo la pupila de entrada del objetivo (¹). De otra parte, se necesita también una pantalla uniformemente iluminada. Resulta, pues, que para una apertura (película) dada y un objetivo también dado, el mínimo tamaño del condensador y la relación entre el diámetro del condensador y la distancia condensador-apertura debe ser tal, que se vean áreas iguales del condensador, a través del sistema óptico, desde todos los puntos de la pantalla. En el diagrama esquemático de la figura 101, las líneas AI y $A'I'$ definen esta relación.

Suponiendo que se ve siempre bajo igual ángulo el condensador desde el foco *(pick-up angle)*, cuanto más pequeño sea el condensador, más pequeñas serán las dimensiones del foco desde el cual la luz puede ser dirigida dentro de un haz a través de la apertura en el objetivo. Por otra parte, las pérdidas en la apertura se disminuyen en la misma medida que decrece el tamaño del condensador. En defi-

(¹) Se llama pupila de entrada de un objetivo la imagen de uno de los diafragmas del objetivo dada por todas las lentes anteriores a él y tal que sea vista desde el objeto bajo el menor ángulo posible; existen varias imágenes de otros tantos diafragmas, pero sólo es pupila el que se ve desde el punto del objeto en que corta al eje, bajo el menor ángulo.

nitiva, la combinación particular de diámetro del condensador y distancia condensador-apertura empleados, responde a un compromiso entre la eficacia de la utilización y el tamaño del foco necesario para suministrar la cantidad deseada de luz.

La luz de un foco dado es más eficazmente utilizada cuanto más refractivo es el condensador, esto es, cuanto más corta es la distancia foco-condensador; sin embargo, a menudo se obtienen altos niveles de iluminación en la pantalla con focos de lámparas de alto vatiaje y salida de luz a gran distancia.

Todas estas consideraciones toman un papel muy importante para la elección del vatiaje del foco en el caso de lámparas de filamento, tipo de sistema óptico, y tamaño y peso del proyector, y de su apreciación práctica han resultado los sistemas típicos usuales; de algunos de estos aspectos nos hemos ocupado ya, y ahora nos toca hacer el estudio de los sistemas ópticos colectores de luz.

Comenzaremos, pues, por el

Tamaño y forma del foco en colectores con condensador. Como ya se ha indicado, el tamaño del foco que un sistema óptico puede utilizar depende del aumento del sistema y de la pupila de entrada del objetivo de proyección. La forma del foco utilizado depende de la posición del foco-imagen; será redondo, si ésta cae en el objetivo de proyección, y de la forma aproximada de la apertura, si aquella imagen cae entre la apertura y el objetivo.

TABLA II «Back-Test» en sistemas ópticos típicos (General Electric)

Tipo de sistema óptico colector	Distancia media foco-condensador, en mm	Objetivo proyección		Back-Test	
		Distancia focal	Abertura f/n	Forma	Dimensiones medias en mm
8 mm					
	15	1″	f/2,0	Oval	6,0
	18	1″	f/2,0	»	7,0
16 mm					
Condensador esférico.	18	2″	f/2,0	Redondo	10,0
» asférico.	18	2″	f/2,0	Redondo u oval	7,5
» »	18	2″	f/1,65	» »	8,5
» »	21	2″	f/1,65	» »	10,0
35 mm					
Prismático (1)	40	5″	Serie I	Oblongo	12 × 7,5
Esférico	40	4″	Serie I	Redondo	15-20
Asférico	40	5 3/4″	Serie II	Oblongo	11-14

(1) Estos colectores están formados por un sistema de lentes escalonadas análogas a las empleadas en los faros de navegación.

Un medio de determinar el tamaño y forma del foco que el sistema óptico puede utilizar consiste en lo que los americanos llaman «back-testing» o prueba hacia atrás; ésta consiste en colocar delante del objetivo de proyección un gran foco de luz difusa y en la posición del foco un marco para sujetar en él papel sensibilizado fotográfico. El foco de luz difusa produce una mancha en el papel, que se ajusta a la forma y dimensiones del foco, que son efectivas. La Tabla anterior da un sumario de análisis de los sistemas ópticos usuales empleados en varios tipos de proyectores. Los datos de proyección de vistas fijas no se incluyen porque dentro de límites razonables las dimensiones del foco no son un factor determinante en esta clase de trabajo. En adición a la importancia desde el punto de vista de las dimensiones del foco, estos datos son de interés como confirmación de algunas de las deducciones hechas anteriormente. Se observa que para la misma abertura relativa de objetivos, los sistemas asféricos no utilizan una superficie de foco tan grande como los condensadores esféricos; su mayor eficacia es debida al gran ángulo sólido bajo el cual son capaces de refractar la luz satisfactoriamente. De otra parte, el uso de objetivos de proyección de gran abertura aumenta las dimensiones útiles del foco, con cualquier tipo de sistema condensador.

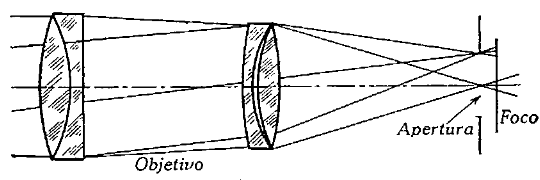


FIG. 102

Una vez conocidas las relaciones de posición y tamaño de foco y sistema colector, vamos a hacer un estudio detallado de las relaciones de abertura del sistema colector y cómo influyen en cada caso reduciendo la abertura efectiva del objetivo de proyección y, por consiguiente, el flujo útil que sale a la pantalla; se verá que en cada caso especial hay que tener en cuenta todas las características del conjunto, y que no es posible de antemano decidirse por uno u otro de los dos sistemas colectores actualmente en uso sin un estudio particular de los elementos empleados en el caso en cuestión.

Influencia de la abertura del colector en ambos sistemas. La iluminación de la imagen proyectada en cine para una combinación dada de foco de luz, colector y objetivo, puede lograrse plenamente mediante un estudio detenido. En primer lugar, es interesante dar una idea breve de los dos tipos usuales de iluminación.

El foco ideal para la proyección debería dar un brillo suficiente y uniforme sobre toda la apertura o ventanilla de proyección, pero que puesto en contacto con la película no perjudique a ésta. Si existiese un foco de tal naturaleza, se reduciría al mostrado en la figura 102. En virtud de la marcha inversa que siempre es posible hacer recorrer a la luz, vamos a imaginar que ésta camina desde la pantalla a la

película en lugar de hacerlo desde la película a la pantalla, como sucede en realidad. En la figura 102 se muestran dos haces de luz, uno enfocado en el centro de la apertura y el otro en uno de sus bordes. El primero llena por completo el área del objetivo de proyección, pero no sucede igual con el haz oblicuo, y toda la luz de este haz que caiga por encima de su rayo superior será detenida por la montura de la lente posterior del objetivo. Cuando el objetivo es corto, en muchos casos no se presenta esta limitación de haces oblicuos; pero si el objetivo tiene mucha longitud, queda reducida la abertura efectiva del objetivo como se ve en la figura 102, lo que lleva consigo una reducción en el brillo marginal comparado con el centro, y esto aun cuando el foco de luz fuese el ideal, como hemos supuesto. Desgraciadamente, ningún foco de luz se aproxima ni remotamente a ese ideal expuesto. Los focos de luz usuales son suficientemente brillantes, pero también bastante pequeños para que haya que requerir el auxilio de la óptica, a fin de que nos dé focos útiles a nuestro objeto; de otra parte, tienen una temperatura muy elevada, que no permite ponerlos en inmediato contacto con la película. El único medio de obviar tales dificultades consiste, bien en emplear un colector de luz compuesto por un sistema de lentes formando un condensador, bien un sistema reflector a base de un espejo. Con ambos métodos podemos conseguir cubrir completamente el área de la apertura, sin otra desventaja que una pequeña reducción en la intensidad, ya que el problema se reduce a determinar para el sistema dado una imagen del cráter de tamaño suficientemente grande para cubrir aquella apertura.

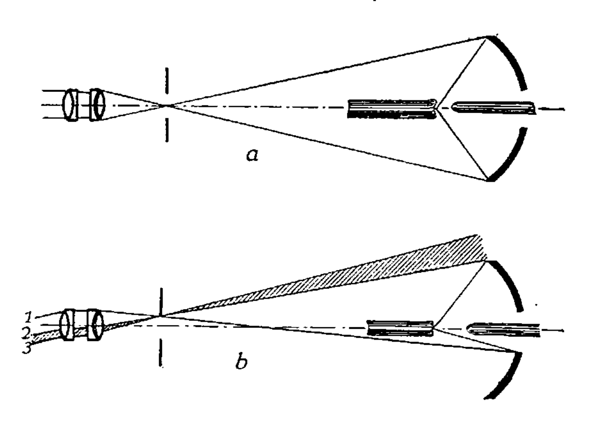


FIG. 103. Colector reflector típico de arco. Objetivo de 5″ de distancia focal, carbones de 11 mm, espejo elíptico de 11,5″ de diámetro: (*a*) haz central de luz, (*b*) haz oblicuo

El máximo tamaño de la imagen que es posible obtener con tales sistemas, condensador o espejo, es función del diámetro del mismo, aun cuando no se puede dar a éste un gran valor a causa de las aberraciones, si tales sistemas tienen gran abertura. Ésta queda limitada por la distancia focal, pero es principalmente la parte económica la que define la cuestión; cuando los condensadores o espejos tienen gran diámetro, su precio sube extraordinariamente a causa de las mayores dificultades de construcción.

Dado, pues, que no es posible hacer los colectores de luz tan grandes como quisiéramos, veamos las consecuencias que de ello se deducen en cada caso. El más simple es usualmente el caso de espejo, y también, en nuestro país, el más usual. La figura 103 representa el conjunto de un objetivo tipo Petzval (Cinephor) de 100 mm, una apertura óptica o ventanilla standard, un arco de carbones de 11 mm el positivo, y un espejo elíptico de 300 mm de diámetro; la imagen del arco se forma en el plano de la película o muy cerca de él, lo cual quiere decir que objeto e imagen deben encontrarse en los focos de la elipse sensiblemente. Como antes, para estudiar este caso vamos a suponer que la luz viene de la pantalla al arco y que la figura está trazada sensiblemente a escala.

La figura muestra en *a* un haz de luz que procede del centro de la apertura, mientras que en *b* se ve la marcha de un haz oblicuo, correspondiente a un borde de la misma. Para el centro de la apertura, el espejo es bastante grande para llenar el área de un objetivo de una abertura relativa de *f*/2,8; un haz de luz centrado de este diámetro, que entre en el objetivo enfocado al centro de la apertura de la película, diverge de ese foco y cae sobre el espejo llenándole totalmente; puesto que apertura y cráter son focos conjugados, ese haz después de reflejado converge en el cráter.

El pincel oblicuo de luz determinado por los rayos 1, 2, 3, está dividido en dos zonas, siendo el rayo 2 un rayo límite cuya posición se determina uniendo el borde superior del espejo al superior de la apertura. El rayo 1 es otro rayo límite, el más alto de los que pueden pasar a través del objetivo desde el borde de la apertura; ambos rayos y todos los comprendidos entre ellos participan en la imagen del borde de la apertura sobre la pantalla, pero evidentemente no abrazan la totalidad de la abertura numérica del objetivo. Los rayos comprendidos entre 2 y 3 son inútiles, pues debido a la pequeñez del espejo no existen. En definitiva, el haz oblicuo de luz está limitado de una parte por la pequeñez del espejo y de otra por la construcción del objetivo; es, desde luego, más pequeño que el haz central, y la iluminación en el borde de la pantalla será menor que en el centro; el haz central limita lo que en los aparatos de óptica suele llamarse *campo de abertura reducida*, mientras que el haz oblicuo abarca el *campo de plena abertura*.

Debe observarse que una nueva complicación aparece por la obstrucción de luz provocada por los carbones y sujetadores de carbones, cuya consecuencia es que tanto el haz central como el oblicuo presentan agujeros o manchas de forma irregular en el centro, siendo ligeramente más grande para el haz oblicuo que para el central. La diferencia no es muy grande de un modo absoluto, pero habida cuenta que el haz oblicuo tiene menor abertura que el central, la reducción relativa es mucho más grande en el primero. Si, como es el caso, se forma la imagen del cráter en la película, la cuestión de seleccionar el tamaño del arco es fácil; si la imagen llena la apertura, es suficiente, pero en

caso contrario no lo es y la parte marginal de la película no recibe iluminación directa.

Vamos a examinar ahora el caso de sistema colector a base de lentes condensadoras y tomaremos un caso típico de las combinaciones usuales en América en el año 1939. Aquí una insuficiencia de aumento hace que la imagen del arco tenga que formarse delante de la película con el fin de cubrir la parte marginal de la misma, lo

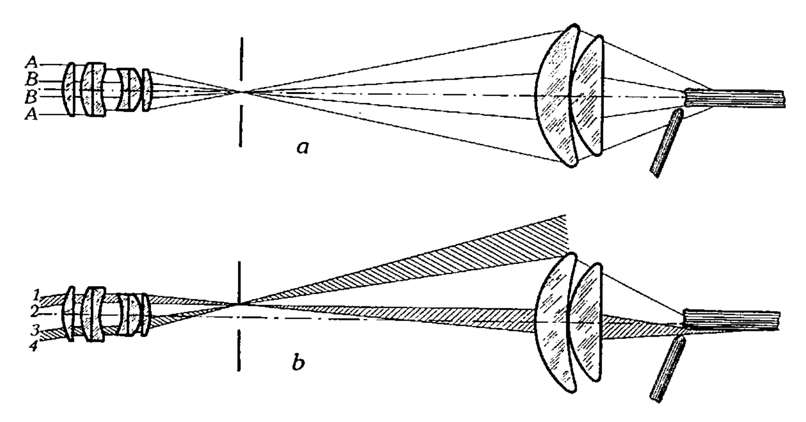


FIG. 104. Colector típico de tipo condensador. Objetivo de 5″ distancia focal, $f/2{,}3$. Condensador asférico de 6″ de diámetro y carbones de 13,6 mm: (*a*) haz central, (*b*) haz oblicuo

que hace la óptica geométrica del sistema algo más complicada que en el caso del espejo. La iluminación en el centro del campo puede ser limitada por el tamaño del condensador o el tamaño del foco de luz de acuerdo con el ajuste, pero no simultáneamente por ambos; en el campo marginal, ambos factores, tamaño del condensador y tamaño del arco, son probablemente los factores limitadores. Estas particularidades se ponen muy bien de manifiesto en la figura 104, en la que también se ha dibujado a escala el sistema formado por el objetivo Super-Cinephor de 100 mm, el sistema condensador más eficaz de uso corriente de 150 mm de diámetro formado por dos lentes, una esférica y otra cilíndrica, y un arco de carbones de 13,5 mm de alta intensidad como foco de luz. La misma figura muestra en *a* el haz de luz que da la imagen del centro del campo, mientras que en *b* muestra el haz que concierne al borde de la película. El objetivo tiene una abertura relativa de $f/2{,}3$; el condensador con referencia al centro de la apertura de la película, de $f/2{,}37$, valor suficiente para llenar prácticamente la abertura del objetivo para el punto central de la imagen. Si trazamos los rayos de un haz de abertura $f/2{,}37$, observamos que cubren completamente el cráter del arco, probando ello que los carbones de 13,6 mm son insuficientes para utilizar la abertura total del objetivo de proyección. Si consideramos el haz que parte justamente de los bordes del carbón, marcados por *B*, *B*, encontramos que forman un

haz de abertura relativa $f/4{,}8$ en el plano del dibujo y $f/6{,}7$ en un plano normal al dibujo, siendo originada esta diferencia por el hecho de que la lente posterior del condensador es cilíndrica a fin de favorecer la dimensión horizontal de la película. Se ve, además, en el dibujo que si se quiere utilizar la abertura $f/2{,}37$, se necesita llevar el cráter hacia atrás separándolo del condensador hasta el punto donde cortan los rayos límites A, A al carbón, pero entonces la parte marginal recibe muy poca o ninguna iluminación; la posición elegida para el arco es un compromiso entre la iluminación central y la marginal.

Hagamos una pequeña digresión referente al tamaño del foco real de luz, para ver que en el caso de arcos de alta intensidad es indeterminado; el diámetro de la parte central más caliente para carbón de 13,6 mm es de 8 mm, tan exactamente como es posible la medida. Aquélla se encuentra rodeada por un anillo de 2,2 mm de anchura que debe contribuir considerablemente con luz, pero que no es tan brillante como la parte central. La abertura relativa mencionada se computa del área central de 8 mm, de la cual emana la mayor parte de la luz, pero esa abertura relativa no representa la verdadera marcha de las cosas, porque la zona de las lentes no activa, según el análisis actual, transmite luz a la pantalla del anillo que rodea el área central.

Refiriéndonos ahora a la figura 104 *b*, se ven cuatro rayos; el rayo 1 es el rayo más alto que puede llegar de la pantalla al objetivo y alcanzar el borde de la apertura; continuando a través del condensador no alcanza el cráter del arco, de tal modo, que dicho rayo no puede existir en la proyección. El rayo 2, después de refractado en el condensador alcanza el borde inferior del cráter, luego el área útil del objetivo en la parte inferior está *limitada por el tamaño del cráter.* El rayo 3 está determinado por el paso por el borde de la apertura y el borde de la apertura libre del condensador; después de la refracción por el condensador alcanza el cráter y, por consiguiente, existe en la proyección; en cambio, un rayo más bajo que el 3, como el 4, no alcanza al condensador, y, por tanto, no puede existir. Así, pues, el rayo 3 limita el área útil del objetivo en la parte inferior y está determinado *por el tamaño del condensador.* La zona entre los rayos 1 y 2 es inútil porque el foco de luz no es bastante grande, y la zona entre 3 y 4 tampoco lo es, porque el condensador es pequeño. Esta posición de la distancia arco-condensador es el mejor compromiso entre la máxima iluminación e iluminación uniforme y nos da una iluminación aproximado en el borde 2/3 menor que en el centro. Llevando el arco hacia atrás, el brillo en el centro de la proyección puede mejorarse, pero sufre en los bordes.

La relación de las áreas útiles del objetivo, para un punto de la imagen central marginal, se ha encontrado, con este ajuste, que es prácticamente la misma en todos los tipos de objetivos, al menos para objetivos de proyección tan diferentes como el Super-Cinephor, el Cinephor y los tipos formados por dos dobletes cementados muy separados; o para los europeos equivalentes Kuprinar y Kinostar respectivamente.

Es prácticamente inevitable, después de las condiciones indicadas, una iluminación más brillante en el centro que en los bordes; por un ajuste conveniente es posible aproximarse a una iluminación más uniforme, pero sacrificando la iluminación total. Esta desigual iluminación es especialmente perjudicial en el caso de las *transparencias* (¹) y se plantea el problema no resuelto de si es posible hacer algo por evitarlo en el proyector, y no parece tenga fácil solución ya que el efecto es casi enteramente debido al carácter de la distribución espacial de la luz transmitida a través de la pantalla. Con una pantalla que sea un difusor perfecto no sería el problema grave; pero, un difusor perfecto transmite tan poca luz en cualquier dirección, que la imagen aparecería demasiado oscura para ser satisfactoria.

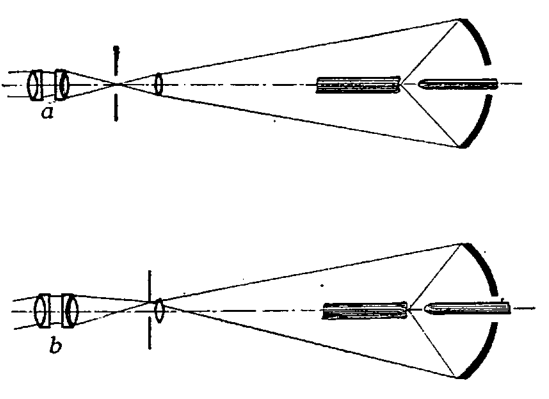


Fig. 105. Reflector de arco con lente suplementaria de apertura: (*a*) haz central, (*b*) haz oblicuo

Lentes de apertura. Una de las sugestiones que se han hecho recientemente ha sido colocar una lente colectora muy cerca de la película, llamada por esto *lente de apertura;* en lo que al efecto de iluminación se refiere, puede ser colocada delante o detrás de la película con igual efecto, pero desde el punto de vista de la proyección, colocada delante de la película formaría parte del propio objetivo de proyección, con la consiguiente degradación de la imagen, por lo que esta posición es impracticable.

La figura 105 muestra la aplicación de una lente de esta clase a un sistema óptico, como el de la figura 103, de donde se obtienen dos consecuencias interesantes: en primer lugar, la apertura angular del haz de luz convergente en el punto central de la apertura de la película se aumenta, con el resultado de que se utiliza mayor área del objetivo de proyección, y habrá más luz en el centro de la pantalla, lo cual se ve fácilmente en *a*; el resultado, sin embargo, no es ventajoso porque va acompañado de una reducción en el tamaño de la imagen del arco, formada por la combinación del espejo y la lente condensadora. Si la imagen del arco fuera inicialmente del tamaño justo para cubrir la apertura, después de intercalar la lente no la cubriría y la distancia del espejo a la apertura debería ser aumentada para resta-

(¹) Utilizadas muy frecuentemente en el rodaje de algunas escenas, en registro.

blecer la imagen del arco al tamaño necesario; entonces la ganancia aparente en la iluminación se perdería por el reajuste. Si la imagen del arco fuera, por el contrario, más grande que la necesaria, la misma ganancia en iluminación podría haberse obtenido sin la lente de apertura decreciendo la distancia del espejo a la apertura y reenfocando el arco, lo que reduce el tamaño de la imagen del arco y aumenta el ángulo de convergencia del haz de luz. Estos efectos se compensan exactamente, y la conclusión es que ninguna ganancia en la iluminación puede obtenerse con una lente de apertura que no hubiera podido ser obtenida por un diferente ajuste del arco al espejo y de éste a la apertura; solamente cuando no haya libertad de movimiento podrá, tal vez, ser útil la lente de apertura.

No obstante, una comparación con las figuras 103 *b* y 105 *b* nos muestra una ventaja insospechada en el uso de la lente de apertura: Mientras que sin lente de apertura, el haz oblicuo sólo en parte alcanza el espejo, debido a su inclinación sobre el eje, la adición de la lente de apertura de la debida potencia desvía el haz, haciendo que el rayo 3 alcance el espejo, y rebajando el punto de incidencia del rayo 1. De hecho, el área total del espejo puede ahora contribuir a la formación de la imagen de un punto de la parte marginal del campo, llevando el nivel de iluminación del borde a un valor más igual al del centro. Pruebas realizadas con reflectores elípticos de 300 mm, carbones de 11 mm a 70 A y un objetivo Super-Cinephor de 100 mm han revelado un incremento en el brillo medio de un 25 % sobre el área entera de la pantalla.

Por otra parte, la condición representada en la figura 104 no puede ser mejorada por la adición de una lente de apertura. Examinando esta figura, se ve con facilidad que si se coloca una lente colectora inmediatamente detrás de la apertura, se cambia la dirección del rayo 4 y los rayos entre 3 y 4 pueden alcanzar el condensador, cosa que no sucede allí. No obstante, no se realiza ganancia alguna, porque el rayo 2 que es un rayo límite del haz activo, determinado por el hecho de ser el rayo más alto que alcanza el cráter del arco, no lo toca si se interpone una lente de apertura. El rayo más alto que alcance el cráter será ahora más bajo que el 2, y lo que se gana en el haz útil por el lado inferior está compensado con la pérdida en el lado superior; el único cambio será el uso de un área diferente del condensador para formar la imagen del borde de la película.

La diferencia esencial entre los dos casos típicos es que en el primero la sola limitación en tamaño del haz de luz, tanto en el centro como en el borde, está impuesta por el tamaño del colector de luz, mientras que en el segundo ambos, foco y colector, son demasiado pequeños para las condiciones bajo las cuales se emplean. En el primer caso, una lente de apertura mejora la igualdad de iluminación, y en caso de que el foco de luz sea bastante grande puede aumentar la iluminación sobre la imagen total más económicamente que aumentando el diámetro del espejo. En el segundo caso, la introducción de

la lente de apertura no parece provechosa según el análisis hecho, comprobado con observaciones experimentales.

Estudio económico sobre el entretenimiento de espejos en colectores de espejo con arcos sistema Suprex. Hasta ahora nos hemos ocupado exclusivamente del aspecto técnico de los colectores de luz, pero cuando, como es casi exclusivamente el caso en locales pequeños y medianos, se utilizan colectores de espejo, el aspecto económico tiene un marcado interés, por lo que vale la pena decir algo sobre el mismo que sirva de orientación a empresarios y operadores.

Una práctica muy corriente en nuestro país, tanto entre los empresarios o encargados de locales como entre operadores, es, de una parte, no utilizar protectores de espejos (tal vez esto esté motivado por las circunstancias que no han permitido la importación de tales vidrios especiales), y de otra, mantener los espejos trabajando aun cuando éstos pierdan mucho de su poder reflector e incluso el plateado en algunas de sus partes, y no reemplazarles, o rehacer ese plateado, hasta que se rompen en pedazos o hasta que las dificultades de trabajo se hacen verdaderamente imposibles de soportar debido a la mala calidad de la proyección; sin tener en cuenta que mucho público deja de acudir al local por encontrarse fatigado e incómodo aun cuando la película valga la pena, la que muchas veces carga con la culpa; y que, además, la supuesta economía queda completamente anulado: por el progresivo aumento de consumo de energía eléctrica que, como consecuencia del menor rendimiento del sistema colector, se ve obligado el operador a proporcionar al arco para aumentar su brillo intrínseco, y de la correlativa necesidad de ir aumentando el diámetro de los carbones y aumento en el consumo de los mismos para conseguir atenuar la caída vertiginosa en la iluminación de la pantalla; estos tres factores: consumo en exceso de corriente, mayor precio de los carbones y mayor número de pares consumidos en un período fijo de tiempo, sobrepasan con mucho la economía de la sustitución o renovación frecuente del espejo y el pequeño gasto del protector; eso sin tener en cuenta la posibilidad de obtener una proyección casi uniforme por períodos muy largos de tiempo y con un tipo muy elevado en cuanto a su calidad y características de color y brillo.

El estudio que damos a continuación, realizado por H. D. Behr para carbones Suprex [1], en el año 1939, comprueba claramente cuanto acabamos de decir, y al final se indican las mejores condiciones en que es más conveniente hacer las citadas renovaciones y los medios auxiliares factibles para evitar en lo posible la degradación de reflectores. Aun cuando lo que vamos a decir se refiere al tipo de alta intensidad simplificada, especialmente, las consecuencias generales son válidas en una cierta medida para todos los tipos de arcos con reflector de espejo.

---

(1) H. D. Behr, *Modern Projection.* Cuatro artículos publicados en «Better Theatres», 22 de julio al 9 diciembre de 1939.

Un estudio en el promedio de muchos teatros muestra, al igual que se ve también en la columna final de la tabla que damos a continuación, que la pérdida acumulativa de luz durante un año en un espejo sin protección, puede elevarse a un 24 % de la luz inicial proporcionada por dicho espejo, aunque esto depende de una serie de circunstancias no tenidas igualmente en cuenta en todos los locales; especialmente el mantenimiento de un alto standard en la proyección y la protección del espejo mientras y después del momento de encender el arco, que es cuando más sufre.

Pérdidas de salida eficaz de luz bajo distintas condiciones, empleando carbones SUPREX positivos de 7 mm y negativos de 6 mm a 42 amperios mínimo y 300 horas por mes

Meses de servicio	Espejo con protector			Espejo sin protector
	Renovado cada 3 meses	Renovado cada 4 meses	Renovado cada 6 meses	
1	[1] 10 %	[1] 10 %	[1] 10 %	2 %
2	12 »	12 »	12 »	4 »
3	14 »	14 »	14 »	6 »
4	10 »	16 »	16 »	8 »
5	12 »	10 »	18 »	10 »
6	14 »	12 »	20 »	12 »
7	10 »	14 »	10 »	14 »
8	12 »	16 »	12 »	16 »
9	14 »	10 »	14 »	18 »
10	10 »	12 »	16 »	20 »
11	12 »	14 »	18 »	22 »
12	14 »	16 »	20 »	24 »
Pérdida media mensual.	11 %	12 %	14 %	12 %
» máxima »	14 »	16 »	20 »	24 »

[1] Estos porcentajes incluyen el 8% de pérdida máxima inicial debida a la superficie de vidrio extra del protector de espejo.

El promedio de las pérdidas producidas por el uso de protectores de espejos efectuadas sobre muchos de éstos, demuestra que tales protectores suponen una pérdida inicial de luz de un 8 % como máximo, cantidad muy pequeña si se compara con la que en una media de doce meses experimenta un espejo sin protección y que llega a alcanzar de un 18 a un 40 %.

No existe una regla fija que nos permita decidir en qué momento debe reemplazarse el espejo o instalar protector para el mismo; un espejo sin protección tiene una pérdida media mensual de un 12 % de luz durante un período de un año, mientras que con la instalación de un protector nuevo *cada cuatro meses* la pérdida media de luz mensual puede mantenerse al mismo porcentaje sin tanta variación entre el principio y el final. Cuando el espejo está sin proteger, la pérdida de luz varía entre cero, al principio, y el 24 % al final del año; mientras que con el protector, la pérdida se mantiene entre un 8 y un 16 %,

en lo que está incluído el 8 % medio de pérdida inicial debida a tal protector. El mismo cuadro muestra que el 16 % puede reducirse todavía más por una sustitución más frecuente del protector. La figura 106 da también la velocidad de depreciación del espejo en varias condiciones. Las pérdidas de iluminación en la pantalla por depreciación del espejo pueden compensarse por un aumento en la corriente del arco; en arcos de alta intensidad simplificada, utilizando carbones de 7 por 6 mm de diámetro, positivo y negativo, un incremento en la corriente dentro del margen de trabajo 42-50 A *produce un incremento en la iluminación aproximadamente doble del aumento de corriente*, lo que significa, como ya dijimos al ocuparnos de su estudio, que la máxima eficacia en producción de luz se logra haciendo trabajar los carbones al máximo de la corriente que se especifica para cada diámetro o juego de carbones. *Cuando los carbones se queman a este máximo, será imposible, pues, compensar con ellos la pérdida de luz.* Habrá necesidad entonces de utilizar carbones más grandes, pero entonces se especifican corrientes superiores; si para ahorrar energía rebajamos la corriente a su tope inferior, por ejemplo de 50 a 42 A, se obtiene una economía de energía eléctrica de un 16 %, pero hay una pérdida de luz de un 32 %.

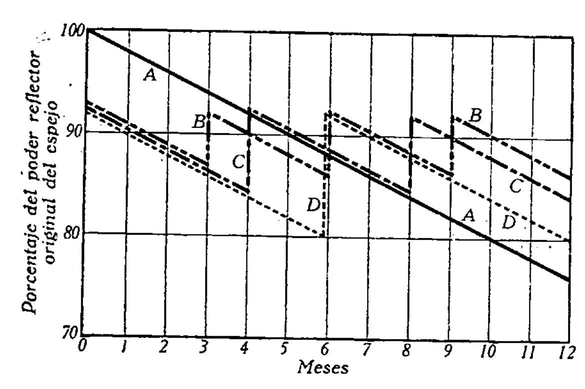


FIG. 106. Velocidad de depreciación: *A*, espejo sin protección; *B*, con protección renovada cada 3 meses; *C*, protección renovada cada 4 meses; *D*, cada 6 meses

Para compensar el 24 % de pérdida de poder reflector de un espejo sin protector, que se deduce del cuadro anterior, al cabo de 12 meses de trabajo, se precisa aumentar la corriente en un 12 %; así, si la corriente mínima recomendada para esos carbones, 42 A, da una iluminación satisfactoria con un espejo nuevo, al final del año harán falta 47 A para obtener la misma iluminación en la pantalla. Con estas hipótesis sobre los porcentajes y sobre la base de trabajar a 42 A inicialmente, ya que en este diámetro de carbones no se puede pasar de los 50 A, se han calculado las tablas que damos a continuación, en las que se supone 300 horas de trabajo al mes. En el caso de que se exceda los 50 A, las cifras de corriente y carbones (consumo) deberán incrementarse proporcionalmente [1].

[1] El precio mucho más bajo a que se vende la energía eléctrica en América nos obliga, para no alterar las estadísticas, a mantener los valores en dólares, pero es evidente que las conclusiones se mantienen aplicables a nuestros teatros.

	A 3 cts el kw/hora	A 4 cts el kw/hora	A 5 cts el kw/hora
Aumento en consumo de energía...	14,70 $	19,60 $	24,50 $
» » de carbones .	35,20 »	35,20 »	35,20 »
Sustitución anual del espejo	40,00 »	40,00 »	40,00 »
Coste anual	89,90 $	94,80 $	99,70 $
Coste medio mensual ...	7,49 »	7,90 »	8,31 »

Si calculamos a base de un espejo con protector renovado cada tres meses, la corriente inicial de arco necesaria para eliminar la pérdida del 8 % inicial originada por el protector nuevo, será de 43,7, frente a los 42 A de antes, y el coste será:

	A 3 cts el kw/hora	A 4 cts el kw/hora	A 5 cts el kw/hora
Aumento en consumo de energía...	13,60 $	18,10 $	22,60 $
» » de carbones .	32,60 »	32,60 »	32,60 »
Sustitución anual protector: 4×8.	32,00 »	32,00 »	32,00 »
Coste anual...........	78,20 $	82,70 $	87,20 $
Coste medio mensual...	6,52 »	6,89 »	7,27 »

Los mismos cálculos para protectores de espejo reemplazados cada cuatro meses, por causa de depreciación, dan:

	A 3 cts el kw/hora	A 4 cts el kw/hora	A 5 cts el kw/hora
Aumento en consumo de energía...	14,80 $	19,70 $	24,60 $
» » de carbones .	35,60 »	35,60 »	35,60 »
Sustitución anual protector: 3×8.	24,00 »	24,00 »	24,00 »
Coste anual...........	74,40 $	79,30 $	84,20 $
Coste medio mensual...	6,20 »	6,61 »	7,02 »

y reemplazándolo cada seis meses:

	A 3 cts el kw/hora	A 4 cts el kw/hora	A 5 cts el kw/hora
Aumento en consumo de energía...	17,30 $	23,00 $	28,70 $
» » de carbones .	41,50 »	41,50 »	41,50 »
Sustitución anual protector: 2×8.	16,00 »	16,00 »	16,00 »
Coste anual..........	74,80 $	80,50 $	86,20 $
Coste medio mensual...	6,23 »	6,71 »	7,18 »

Comparando todos estos datos se ve que la sustitución del protector cada cuatro meses da la mayor economía en el coste anual; además, se ve que es más económico el reemplazar un protector de espejo cada cuatro meses que adquirir un espejo nuevo al final de cada año.

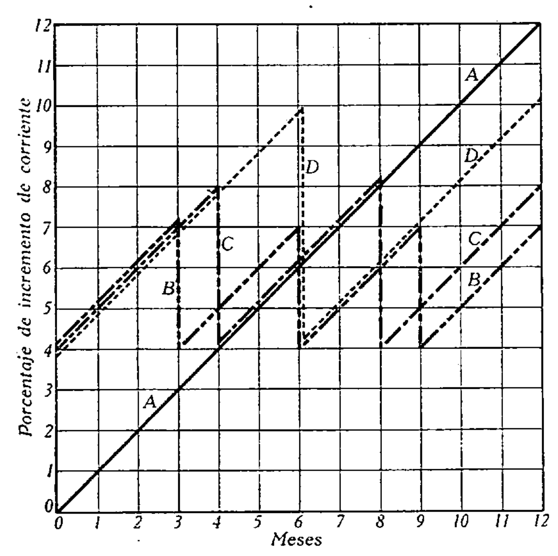


Fig. 107. Porcentaje de incremento de corriente requerido por depreciación del espejo o su protección: *A*, espejo sin protección; *B*, espejo con protección renovada cada tres meses; *C*, renovada cada cuatro meses; *D*, cada seis meses

En la figura 107 se ha representado el porcentaje de incremento de corriente, necesario para mantener la luz en la pantalla a un nivel igual al que da el espejo nuevo. Se observa en particular que el incremento de corriente para un espejo sin protección varía entre el cero y el 12 % anual, mientras que con protector reemplazado cada cuatro meses, este incremento varía entre el 4 y el 8 % anual.

Fuera del caso particular de los elementos que hemos considerado, existen una serie de caminos abiertos para hacer economías en los gastos por estos conceptos, que pueden resumirse así:

a) Proteger el espejo por un largo período de tiempo después de encender el arco.

b) Reemplazar los espejos al menos cada ocho meses (1200 horas de uso); es corriente encontrar espejos con dos o más años de trabajo sin restitución.

c) Emplear protectores de espejo o algo semejante.

d) Elevar el amperaje de arco, cosa que no será posible si se trabaja a tope para el tipo de carbón empleado.

e) Incrementar el tamaño de los carbones.

f) Instalar arcos de alta intensidad, lo que equivale a arrinconar el equipo actual.

g) Permitir que la depreciación por deterioro continúe y se haga cada vez peor la proyección. Claro está que esto último no responde a un criterio económico del negocio.

VII. La linterna y el crono o proyector

La linterna

El conjunto constituído por el foco de luz y sistema colector, juntamente con todos los elementos de regulación, ya sean manuales o automáticos, suelen estar contenidos en una caja metálica con las paredes interiores revestidas de un material refractario que generalmente es amianto, y tal conjunto recibe el nombre genérico de *linterna*. Además de los tipos modernos de alta intensidad, de los cuales la figura 108 puede servir de prototipo juntamente con la que ya dimos en la figura 43, al tratar del foco de luz o lámpara de arco, suelen acoplarse en la linterna: un amperímetro para conocer en todo momento y con comodidad el consumo de corriente; un cenicero destinado a recoger los residuos de la combustión del carbón; un sistema desviador óptico, que reproduce sobre una cartulina o placa convenientemente localizada en el exterior de la linterna, una imagen del arco, sobre la que se encuentran señales o indicaciones acerca de la posición adecuada de los carbones y permite observar si éstos se queman en condiciones adecuadas; un obturador de seguridad que cierra el paso de la luz y el consiguiente calor radiado, en el momento en que por cualquier causa se detiene la película en su paso por la ventanilla, lo que podría, en otro caso originar la inflamación de aquélla por la gran cantidad de calor concentrado en la misma, y, por último, un sistema de pantallas protectoras que pueden desviarse a mano y que tienen por objeto proteger

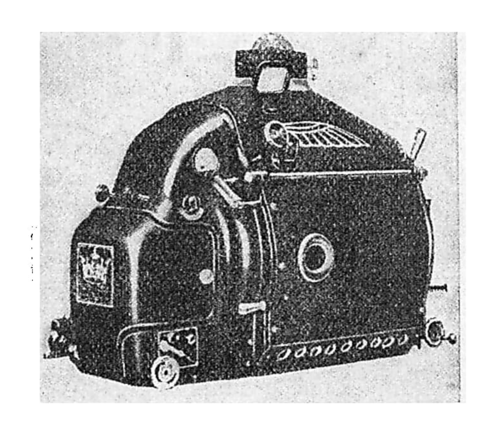


FIG. 108. Lámpara de protección «Mon-Arc»

el espejo del colector de luz, en el momento de encender el arco hasta que adquiere su régimen normal, evitando que puedan incrustarse en el mismo residuos incandescentes de carbón o de las substancias que recubren éste en algunos tipos. No cabe dar aquí una descripción detallada de las linternas comerciales; todas ellas presentan características muy semejantes, y modernamente adoptan líneas exteriores aerodinámicas más o menos acertadas, siendo un requisito indispensable que todas deben llenar en la mayor medida posible el de disipar por radiación la mayor cantidad posible de calor, que sean de manejo cómodo y fácil, de forma que el operador pueda en todo momento controlar y observar si la posición de los carbones, combustión de los mismos y régimen de consumo de corriente es el adecuado. No es buena práctica, como se ha intentado a veces con deflectores de aire, provocar una corriente de aire en el interior de la linterna al objeto de disipar por convención algo del calor desarrollado en el arco; la mayoría de las veces, el único resultado positivo logrado es una inestabilidad de la llama o dardo y una variabilidad en la posición del cráter, que son en extremo desastrosas para la proyección. La figura 109 representa una linterna Ashcraft tipo E de alta intensidad, uno de los tipos más modernos distribuídos en España y Portugal por Western Electric.

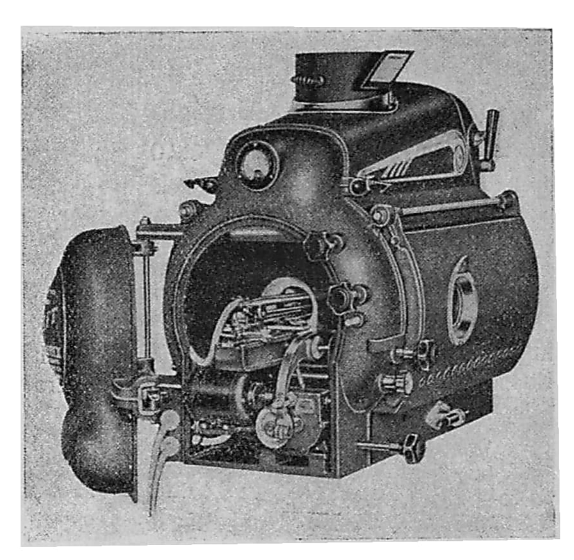


FIG. 109. Corte posterior que presenta el regulador del arco, el conjunto negativo, el magneto estabilizador y los reguladores

El crono o proyector (1)

El proyector o crono es un mecanismo mediante el cual se colocan las imágenes o cuadros sucesivos de la película en posición adecuada para su proyección entre el foco y colector de un lado, y el objetivo

(1) No nos referiremos aquí, por su poca difusión, a los proyectores de arrastre continuo como el Mechau, fundados en la propiedad que tiene la imagen óptica reflejada en un espejo de girar un ángulo doble del que haya girado el espejo, y empleado casi exclusivamente por los alemanes.

del otro, arrastrando dicha película con movimiento intermitente a la velocidad normal de 24 imágenes por segundo y obturando la proyección de la imagen cuando la película se encuentra en movimiento entre un cuadro y el siguiente.

Atendiendo a estas diversas funciones que debe efectuar, lo consideraremos constituído por los siguientes mecanismos parciales:

a) El sistema de arrastre intermitente.
b) El sistema de obturación.
c) El sistema de alimentación.
d) El sistema de encuadre.

a) **El sistema de arrastre intermitente.** Su misión, como su propio nombre indica, consiste en arrastrar la película a razón de 24 imágenes por segundo con movimiento intermitente. En el caso de la película normal de 35 mm ésta es la velocidad standard, pero para películas de 16 mm esa velocidad puede variar, según se trate de película muda o sonora, entre 16 cuadros por segundo para la primera y 24 para la segunda [1]. En las cámaras de cine tomavistas suelen existir tres velocidades tipo: la llamada mitad, de ocho imágenes por segundo, la cual sirve para acelerar ciertas acciones y dar más luz a escenas oscuras, la normal de 16 imágenes para película muda, y de 24 para la sonora, y, por último, la de movimiento lento o velocidad superior de 64 imágenes por segundo. Se comprende, pues, que los proyectores de 16 mm sean muy versátiles o flexibles en cuanto a su velocidad, y que, debido a esta circunstancia, el sistema de arrastre intermitente y aun, en algunos casos, el de obturación difieran bastante de los empleados en los proyectores de teatro para 35 mm.

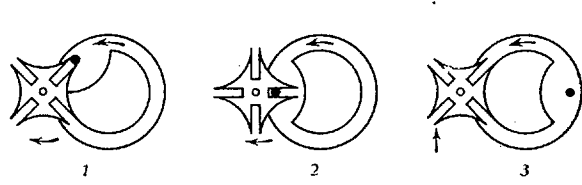


FIG. 110. Mecanismo de cruz de Malta

Para éstos, el sistema más generalizado es el llamado de *cruz de Malta*, por la forma de una de sus piezas, y situado inmediatamente debajo de la ventanilla de proyección o apertura óptica. Esencialmente, consiste en un eje, en uno de cuyos extremos (fig. 110) va montado el rodillo de arrastre de la película, llamado, por ello, *rodillo de cruz de Malta*, el cual tiene 16 dientes en su periferia para engranarse con las perforaciones de la película. Sobre el otro extremo del eje va montada una pieza en forma de cruz y que tiene un corte especial y cuatro ranuras en ángulo recto. Sobre un eje paralelo al an-

[1] En determinadas circunstancias puede descender a 10 cuadros por segundo, lo que influye notablemente en la obturación y eliminación del *flicker* o centelleo de la imagen.

terior gira con velocidad uniforme de 24 revoluciones por segundo un disco circular de radio ligeramente inferior a la separación entre ambos ejes y que lleva en una de sus caras un vástago que puede penetrar en las ranuras de la cruz de Malta. Este vástago tiene para ello un diámetro ligeramente inferior al ancho de aquellas ranuras, y su distancia radial a su eje de giro es igual a la separación entre los dos ejes, menos la que separa el fondo de la ranura del eje de cruz. En la misma cara en que se encuentra el vástago hay una pieza pegada a aquel disco llamada excéntrica, que tiene su superficie también circular, salvo en una pequeña región en la cual está recortada. Esta excéntrica sirve para inmovilizar la cruz de Malta en sus posiciones de reposo, deslizando en su movimiento sobre el borde o periferia de aquélla, mientras una imagen está siendo proyectada en la pantalla. Precisamente en la región recortada de la excéntrica, se encuentra el vástago del disco anterior, que engrana con la cruz, y tal recorte o escotadura de la excéntrica no tiene otro objeto que dejar paso a un brazo de la cruz cuando el vástago engrana o penetra en una de las ranuras de aquélla, permitiendo avanzar a ésta un cuarto de vuelta con completa libertad. En la figura 110 se ve cómo funciona este mecanismo; dado que el eje del disco que lleva ese vástago gira a 24 revoluciones por segundo y que en cada revolución gira la cruz $^1/_4$ de vuelta, este avance corresponde a $^{16}/_4 = 4$ dientes del rodillo de arrastre, es decir, exactamente un cuadro o imagen de la película, ya que, como veremos después, cada imagen de la película lleva cuatro perforaciones. Este movimiento, sin embargo, no es uniforme para la cruz de Malta; es decir, en el cuarto de vuelta, la velocidad no se mantiene constante, sino que su velocidad aumenta desde cero, en la posición 1, hasta un máximo, en la posición 2, de 3 m por segundo aproximadamente, y se desacelera desde esta posición hasta que el vástago vuelve a abandonar la ranura por la parte inferior en que vuelve a ser cero, permaneciendo en reposo la cruz, como en la posición 3, mientras gira el disco de excéntrica hasta coger el vástago la ranura siguiente por arriba. El rodillo de cruz sufre, pues, aceleraciones y desaceleraciones muy rápidas, y se precisa, por tanto, que su masa sea lo menor posible con el fin de que las fuerzas de inercia que se oponen al movimiento se reduzcan al mínimo; es quizás ésta la razón por la cual todos los rodillos de cruz suelen estar vaciados en sus cabezas a fin de hacerlos lo más ligeros posible.

Obsérvese que el ángulo que abarca el movimiento de la cruz, visto desde el centro de rotación uniforme de la excéntrica, es también precisamente de 90°, esto es, $^1/_4$ de revolución; luego el tiempo durante el cual la cruz y rodillo de arrastre están en movimiento, y, con ella, la película para pasar de un cuadro al siguiente, es $\frac{1}{4} \times \frac{1}{24} = {}^1/_{96}$ segundos, y el resto hasta $^1/_{24}$ segundos, es decir, $^1/_{24} - {}^1/_{96} = {}^1/_{32}$ segundos, la película está en reposo, suponiendo que la proyección se haga a 24 imágenes por segundo; en definitiva, cada imagen permanece

quieta delante de la ventanilla de proyección $^{1}/_{32}$ segundos y se pasa de una imagen a la siguiente en $^{1}/_{96}$ segundos, lo que, como veremos después, son datos muy útiles para el estudio de la obturación [1]. La figura 111 nos da un diagrama de velocidades para el caso de 24 imágenes; debe hacerse notar que el trabajo máximo lo efectúa el disco que lleva el vástago en el momento en que éste engrana con la ranura de la cruz, esto es, cuando ésta empieza a moverse, ya que entonces tiene que vencer la resistencia que opone toda la película que se encuentra almacenada en la parte superior, o, al menos, la que opone al movimiento de la película los patines y presores de la ventanilla de proyección; en cambio, cuando el vástago abandona la ranura de cruz, todo ese trabajo desaparece. Ese trabajo tiene que vencerlo el motor en el momento del arranque, si el vástago se encuentra en esa posición o en otra más avanzada, pero todavía dentro de su recorrido en la ranura; y como a ese trabajo hay que añadir todo el necesario para mover el sistema completo venciendo su inercia, que es relativamente grande, se comprende que para evitar tal sobrecarga del motor en el momento del arranque y con el fin de que éste se efectúe en un período de tiempo de 8 segundos, que es el máximo tolerable para hacer el cambio de máquinas, debe tomarse la precaución de colocar el crono de modo que el vástago se encuentre recién salido de su ranura de cruz, que es la posición más ventajosa. Ello tiene, como veremos después, otra ventaja: la de no perder longitud en el bucle de película que, para evitar una resistencia excesiva al movimiento de toda la película sin proyectar, se antepone al paso de la película por la ventanilla. Según la posición que ocupe dicho vástago a lo largo de su recorrido, especialmente si la máquina se encuentra cargada con película, ésta empleará tiempos distintos en acelerarse hasta adquirir la velocidad de régimen; y de aquí que cuando se quiere comprobar el período de arranque de las máquinas, convenga situar, a ser posible, en la misma posición siempre la cruz de Malta; pudiéndose dar el caso incluso de que el par de arranque sea insuficiente para mover la máquina si está cargada.

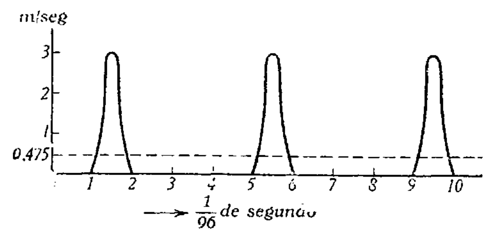


Fig. 111. Diagrama de velocidad de la cruz de Malta

Es también de mucha importancia que el juego o ajuste entre ambas piezas, vástago y cruz de Malta, así como entre la cruz y la excéntrica, sean muy precisos, pues de otro modo cada vez que el vástago recoge la cruz lo hace con un golpe perceptible, lo que es debido a que la ranura de la cruz no se encuentra según la tangente

---

[1] Es evidente que el rodillo de cruz dará 6 r p s después de lo dicho.

a la excéntrica, y algo análogo sucede a la salida; si el ajuste entre cruz y excéntrica es malo o si ésta está desgastada, pueden originarse pequeños desplazamientos de la imagen proyectada que son causa de que la proyección *baile*, lo que es muy molesto y fatigoso para la vista del espectador. En algunos tipos de cronos existen unos tornillos que permiten un reajuste cuando por efecto del uso aquellas piezas han sufrido un desgaste. Con finalidades semejantes y para evitar toda oscilación de la proyección, se han comenzado a utilizar con éxito sistemas intermitentes con doble cojinete, de lo que vemos un ejemplo en la figura 112. En todos los cronos este sistema intermitente suele ir sumergido en aceite en un cárter semejante a lo que se hace en los coches.

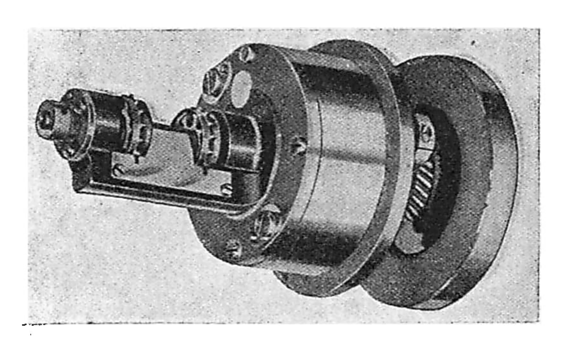


FIG. 112. Tipo moderno de mecanismo de cruz de Malta con doble cojinete

Para su funcionamiento correcto es extraordinariamente importante que mientras el obturador está abierto, permitiendo al haz de luz el ser proyectado en la pantalla, la película sea mantenida firmemente en su plano. Para tal finalidad, los resortes de patines de la compuerta de la ventanilla de proyección y las guías de la película en el cuadro que forma la apertura, deben estar propiamente ajustados.

Cuando esto no sucede así, la película puede moverse mientras el obturador está abierto, y salirse de su propio plano, lo que afecta el correcto enfoque en la pantalla. El mecanismo de cruz de Malta debe actuar de tal modo que evite un movimiento de tirón verticalmente, lo que ocasiona en la pantalla lo que los americanos llaman *picture jump* (salto de la imagen) u oscilación vertical. Un fabricante a la cabeza de los productores de mecanismos de cruz de Malta, especifica que esta oscilación vertical no debe exceder de $^1/_4$ de pulgada, para una imagen en la pantalla de 9 por 12 pies. Puesto que un objeto cuya área sea de $^1/_2$ pulgada cuadrada es ampliado en la pantalla, por término medio (ello depende de la longitud de foco del objetivo), a unos 300 pies cuadrados aproximadamente, se comprende lo muy delicado de aquella operación y por qué los mecanismos de proyectores deben ser fabricados con gran precisión. Debe tenerse presente que estos mecanismos trabajan a intervalos de 20 minutos durante 18 a 20 horas diarias y deben mantener su eficacia durante 2 a 3 años antes, de que hayan de reconstruirse. Hay, en fin, otra serie de funciones del mecanismo de un proyector, como disminuir el peligro de fuego, salvaguardar la delicada emulsión de la película y mover

propiamente todas las partes mecánicas del mismo. Debe tomarse también en consideración la seguridad en el mantenimiento de la mayor eficacia durante un largo período de tiempo, con un mínimum de cuidado por parte del operador, así como la previsión de su más económica reconstrucción cuando ésta sea necesaria. Por último, debe tenerse muy en cuenta la naturaleza del local en que debe trabajar; pues mientras algunos están diseñados para locales en los que el trabajo es de unas pocas horas por semana, no superior a treinta y cinco,

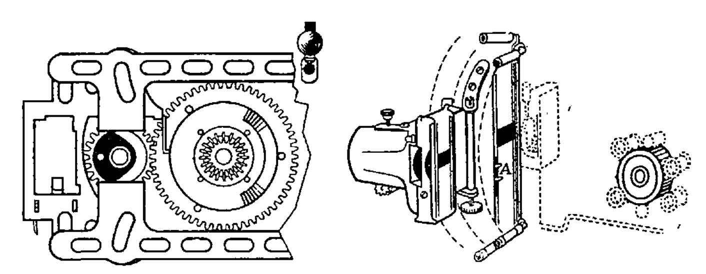


FIG. 113

y no tiene sentido emplear proyectores de lujo, en otros locales se ha comprobado de una manera definitiva, que un proyector de lujo es, desde el punto de vista de una más mejorada calidad en la imagen y de el coste de mantenimiento, mucho más económico.

Mecanismo para 16 mm. Como ya hemos indicado, tanto en la cámara como en el proyector se requiere una gran elasticidad en el caso de los 16 mm a fin de poder tomar muy distintas velocidades. Cámaras y proyectores tan acreditados como los de Bell & Howell, Víctor, Mitchel, etc., utilizan las de 8, 12, 16, 24, 32 y 64 imágenes por segundo (1); esto es, desde la mitad a cuatro veces la velocidad normal en esta clase de película de 16 imágenes por segundo. Es, precisamente, en razón de esta flexibilidad por lo que el sistema intermitente no suele ser de cruz, sino de *uña o lanzadera,* del cual existen gran variedad y que, en el caso del Víctor, representamos en la figura 113; a la izquierda se ve una leva o excéntrica que gira con velocidad uniforme entre dos palancas o lanzaderas, las cuales son las encargadas, como se ve en (A), de arrastrar la película en su movimiento de descenso, pues en el de ascenso se desplazan hacia atrás, dejando libre la película, engranando en las dos perforaciones que corresponden a cada imagen en este tipo de película. Dado que este tipo de crono se utiliza con película sonora que no lleva perforación

(1) La nueva cámara *Fantax* fabricada por Western Electric, de 8 ó 16 mm, permite exposiciones de hasta 8000 cuadros por segundo a una velocidad de 0,000033 de segundo por cuadro. Esta cámara lleva un obturador óptico rotativo, y con ella se han obtenido valiosas fotografías del experimento de Bikini sobre la bomba atómica, y ha prestado valiosos servicios en aviación durante la segunda Guerra mundial.

en el lado de la banda de sonido, esas dos uñas están localizadas en uno solo de los lados de la apertura, aun cuando en general existen sistemas intercambiables con dos, una a cada lado, cuando sólo se utiliza película muda. Es también cada vez más extendido el sistema con una sola uña o intercambiable con dos uñas a cada lado, según las preferencias y opiniones respecto al menor desgaste de uno u otro tipo provocado en la película y según la presión desarrollada sobre la película a su paso por los presores de la apertura. En todos los casos es interesante examinar el movimiento de las palancas lanzaderas; en buena teoría, y muy aproximadamente en la práctica, en las marcas antes mencionadas, el movimiento debe ser tal que cojan la película exactamente bajo un ángulo de 90°, moviéndose en esa posición hacia abajo una longitud igual a la que media entre dos perforaciones, y abandonando la perforación también exactamente a 90°; esto es, su gráfica debe ser la señalada en la figura 114, *a*; sin embargo, en una gran cantidad de proyectores baratos de película subnormal y de 8 mm se efectúa, por el sistema de arrastre, un movimiento de tipo elíptico, tal como el señalado en la misma figura 114, *b*, el cual *sierra*, por decirlo así, la perforación de la película, y por ello no es recomendable, aun sin tener en cuenta que con película defectuosa el avance se hace más irregular, dando muchas veces lugar al defecto de salto vertical de la imagen *(picture jump)*.

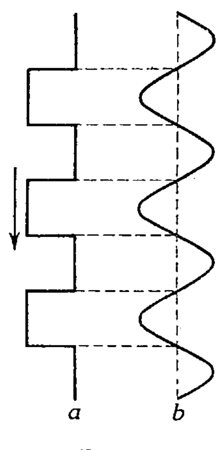


FIG. 114

Finalmente, los sistemas de intermitencia antiguos de 8 mm llevaban un mecanismo constituído por una pequeña palanca, dispuesta en el recorrido de la película en la ventanilla y en roce constante con el canto de la película; en lugar adecuado con respecto a la posición de los letreros de la película, había en su canto una escotadura en la que penetraba la palanca, y entonces se desembragaba el mecanismo de arrastre, hasta que concluía el recorrido de un tornillo sin fin en su interior, en que se embragaba nuevamente aquel mecanismo de avance. De este modo, la película se inmovilizaba por un tiempo, siempre el mismo, para la lectura de letreros o escenas que se deseaba contemplar en reposo; tal sistema ha sido hoy abandonado en razón, principalmente, de su ineficacia cuando la película está algo deteriorada, que hace que se interrumpa el arrastre en cualquier defecto o «piquete» de aquélla y a que el tiempo dado a cada letrero es siempre el mismo, sea largo o corto.

b) El sistema de obturación. Según vimos ya, tiene por finalidad interceptar el haz de luz sobre la pantalla mientras la película se mueve para pasar de un cuadro al siguiente, y también (véase Capítulo III, *Origen del parpadeo y modo de evitarlo)*, durante la proyec-

ción de cada imagen para evitar la producción del *flicker* o parpadeo de la escena proyectada, debido al tránsito brusco de luz a oscuridad, que se hace desagradable, originando fatiga en el ojo del espectador (1).

Existen dos tipos de obturador: el rotatorio, de disco, y el cilíndrico, y por ser este último menos difundido y en gran medida equivalente al primero, sólo de aquél nos vamos a ocupar.

Está constituído por un círculo de metal o cartón muy ligero, que va montado sobre un eje normal al de la excéntrica del sistema intermitente y girando a la misma velocidad de 24 r p s en los cronos de 35 mm; su plano es, pues, paralelo al de la película en su paso por la apertura. Este disco lleva varios sectores vacíos para dejar pasar la luz y otros llenos o *palas*, que interpuestas en el cono de luz cortan su proyección sobre la pantalla. El cilíndrico es un cilindro hueco con algunas zonas de su superficie también vacías, y que gira sobre su eje, dispuesto éste en sentido normal al del cono de luz; la única diferencia radica, pues, en la manera de *barrer* o cortar la luz de la apertura, pues mientras el primero lo hace en diagonal, el segundo lo hace en el sentido de la altura de la imagen; pero sensiblemente esto no afecta a cuanto vamos a decir, por lo que todos los razonamientos son fácilmente aplicables al cilíndrico.

El número de palas que debe tener el obturador rotatorio, así como la amplitud angular de las mismas, depende de la naturaleza de la luz con que se proyecta (si es alterna o continua), del número de imágenes por segundo proyectadas y del grado de perfección que se quiera lograr en la eliminación del parpadeo de la imagen, así como de la cantidad de luz perdida por imagen en la pantalla, indispensable para evitar ese parpadeo, existiendo un verdadero compromiso entre todos esos factores, para el logro de la mejor proyección.

Si sólo tuviésemos en cuenta la obturación necesaria para desplazar la imagen, es evidente que bastaría una sola pala, la *pala de obturación*, de amplitud angular suficiente para cubrir la ventanilla o apertura de proyección mientras se está moviendo la película; únicamente habríamos de preocuparnos de compensar la masa de dicha pala para evitar el esfuerzo de flexión ejercido sobre el eje de giro por la fuerza centrífuga desarrollada en razón de su rápida rotación. Es por esta razón, además de la reducción del *flicker*, por la que la mayoría de los obturadores de este tipo, cuando trabajan con corriente continua, llevan además otra *pala de interrupción*, girando a 24 r p s, esto es, una revolución por cada imagen proyectada. Puesto que, según vimos, la película se encuentra en reposo durante $^1/_{32}$ segundos y en movimiento durante $^1/_{96}$ segundos dentro de cada $^1/_{24}$ segundos, hace falta, si utilizamos una sola pala, que la relación entre la parte transparente y la opaca sea como $^1/_{32}$ es a $^1/_{96}$; esto es, de 3 a 1, lo que se logra dando a la pala de obturación

(1) Conviene recordar aquí todo cuanto dijimos en aquel lugar respecto a la eliminación del *flicker*, el cual reviste una importancia excepcional en los problemas de televisión. (Véase en esta misma colección: *Receptores de Televisión*).

una amplitud angular de 90°; y cuyo efecto es cortar la luz proyectada en un segundo sobre la pantalla en $^1/_4$ de su valor sin obturador, lo que supone una pérdida del 25 % del flujo total; de esta forma, no obstante, habremos suprimido los efectos de deslizamiento de imágenes, pero persistirá el *flicker*, y, en todo caso, convendrá situar el obturador en la parte más estrecha del cono de luz a fin de que el tiempo empleado en barrer el área de la apertura sea el menor posible [1]. Hace ya tiempo que se ha desterrado la práctica antigua de colocar el obturador entre el objetivo y la pantalla, no sólo por la razón anterior, sino para poder cortar, al mismo tiempo que el flujo de luz, el flujo de calor que cae sobre la película, y así la práctica hoy generalizada es colocarlo entre el foco y la apertura. Con idéntica finalidad, es costumbre en algunos tipos de cronos dar a las palas del obturador una ligera inclinación al objeto de que en su rotación actúen como un aspirador de aire, con lo que refrescan ligeramente la película.

La reducción del parpadeo o *flicker* exige mayor número de palas de interrupción, y su número y amplitud angular es algo, aún hoy, hasta cierto punto, convencional y producto de la experiencia. En proyectores de 16 mm a 16 imágenes por segundo, se suelen emplear tres interrupciones por imagen contando la de obturación, siendo las de interrupción de menor amplitud angular que la de obturación, y un obturador para tales casos de una sola pala debe girar tres vueltas por imagen, o bien tener tres palas y dar una revolución por cada ciclo completo de la leva o excéntrica. Sin embargo, a 21 imágenes sólo se percibe ventaja en la eliminación del parpadeo, con tres interrupciones, cuando se utiliza corriente alterna en el arco, y lo normal es utilizar con corriente continua dos interrupciones, esto es, 48 por segundo mediante el empleo de dos palas, que si son de 90° de amplitud angular, reducen la luz proyectada en un 50 %. Desgraciadamente, esta reducción es considerable a causa de que la luz es enteramente cortada durante una parte del tiempo de proyección de cada imagen. El efecto del parpadeo es tanto más acusado cuanto menor sea el número de imágenes proyectadas por segundo, y debido a la versatibilidad de los cronos de 16 mm, que pueden descender hasta 10 cuadros por segundo, se comprende la necesidad de tres interrupciones por imagen. Con 48 interrupciones, el *flicker* se hace ya perceptible a velocidades iguales o menores de 12 imágenes por segundo.

Manera de aumentar la luz en la pantalla. Como acabamos de ver, un obturador normal de dos palas de 90°, como los usuales en cronos de 35 mm a razón de 24 imágenes, corta o roba un flujo de la pantalla igual a la mitad de su valor total en cada imagen, o sea el 50 %. Para aumentar en lo posible el flujo útil en cada segundo que se lanza sobre la pantalla, se ocurre inmediatamente reducir la amplitud angu-

[1] Siendo proporcional la cantidad de luz lanzada sobre la pantalla al flujo de luz y al tiempo, se comprende el interés en reducir todo lo posible el tiempo de interrupción, para disminuir la pérdida de luz en la pantalla.

lar de las palas; pero esto no puede hacerse más allá de ciertos límites; para la pala de interrupción porque llega a reaparecer el fenómeno del parpadeo, y para la pala de obturación porque, como es conocido, debe tener la amplitud angular suficiente para cubrir el movimiento de la película, al ojo del espectador.

Considerando las velocidades de rodillo de la cruz y obturador, se ve en seguida que la pala de obturación comienza a reducir la sección del flujo de luz que sale hacia la pantalla antes de que la película se ponga en movimiento (pues en otro caso habría deslizamiento de la imagen en la pantalla), y ésta no debe comenzar a moverse hasta que la pala haya cubierto totalmente la apertura óptica de proyección. De igual modo, esta apertura comienza a iluminarse en el preciso instante en que la película, después de avanzar un cuadro, vuelve al reposo y el flujo de luz no adquiere su sección total hasta que la pala de obturación ha terminado de salir del área de la ventanilla. Un razonamiento análogo puede hacerse para la otra pala; pero aquí no existe la limitación en cuanto al tiempo empleado en moverse la película, y por ello su amplitud angular suele ser menor, mientras que si reducimos excesivamente la amplitud de la primera pala, llegará a tomar un valor tal que, aun suponiendo que la película comience a moverse cuando ya está cerrada toda la apertura, la pala comenzará a abrir la apertura sin que todavía la película haya alcanzado su posición de reposo.

En definitiva, al intervalo de tiempo de $^1/_{96}$ segundos en que la película está en movimiento y durante el cual la ventanilla debe permanecer cerrada, hay que agregar dos intervalos de tiempo iguales (o al menos puede lograrse que lo sean), de los cuales en el uno decrece el flujo máximo de luz lanzado a la pantalla y en el otro crece; el primero es el empleado por el borde de avance de la pala en barrer toda la apertura, y el segundo es el empleado por el borde de cola de la pala, desde que la película queda en reposo hasta que dicho borde alcanza la ventanilla, más el empleado también en barrer totalmente dicha ventanilla. Es evidente que este primer intervalo de tiempo del borde de cola puede hacerse nulo, eligiendo convenientemente el ancho de pala en relación con las dimensiones de la apertura, y entonces los tiempos t_1 y t_2, que corresponden a la entrada y salida de pala en la apertura, serán iguales. El tiempo, pues, durante el cual hay variación de flujo de luz e incluso anulación será $\tau = t_1 + {}^1/_{96} + t_2$, y, como ya vimos antes, hay interés en reducir los tiempos t_1 y t_2 en la mayor medida posible, ya que ambos determinan una pérdida de flujo sobre la pantalla sin beneficio alguno para la obturación. Para una ventanilla dada, estos tiempos dependen del ancho de la pala y de la velocidad angular del obturador. La figura 115 muestra un diagrama de flujos superpuestos al de velocidades que hará ver claro cuanto acabamos de decir.

No podemos utilizar el recurso de aumentar la velocidad del obturador porque ello llevaría consigo un aumento de la amplitud angular de las palas; pero se emplea un recurso equivalente que no presenta

tal desventaja y que produce el mismo resultado que si se hubiera duplicado aquella velocidad; tal es el sistema de *doble obturación*, que permite el uso de palas entre 70° y 75° de amplitud, con un aumento de luz efectiva proyectada en la pantalla de un 25 % de la luz total lanzada por cada imagen, a condición de que ambos obturadores se sitúen en la sección más estrecha del cono de luz.

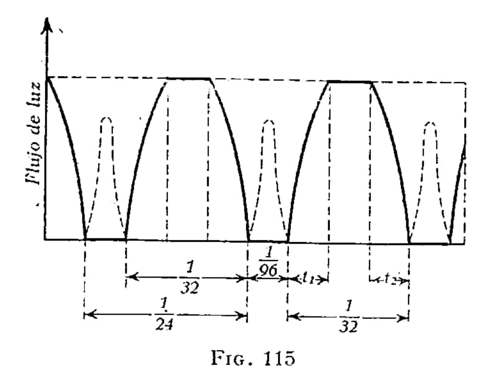
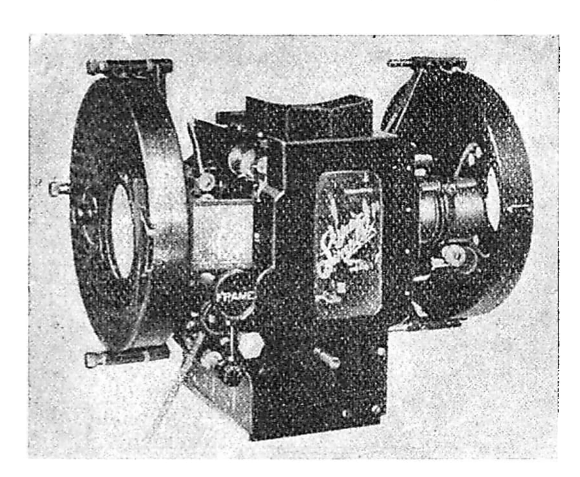


FIG. 115

La figura 116 muestra el mecanismo de intermitencia y doble obturación DD 66 empleado por la firma Simplex [1] a partir del año 1940 y muy generalizado en América en locales de primera categoría. Este sistema consta de dos obturadores de dos palas, montados sobre un mismo árbol y girando con igual velocidad, pero en sentidos contrarios, estando, además, sincronizados de modo que las palas se crucen delante de la apertura y precisamente en su centro. Con ello se puede reducir el ancho de pala y también los tiempos t_1 y t_2, de régimen variable, que quedan reducidos a su mitad. Esto produce un aumento en el período de iluminación de la pantalla de un 20 por ciento del total de proyección de cada imagen, lo que proporciona una gran variedad de tonos grises en película en blanco y negro, pues permite aumentar los contrastes y ver mejor las escenas oscuras, y da una mayor variedad de colorido en el tecnicolor. Otra ventaja presenta el sistema de doble obturación con respecto al ordinario sencillo; en éste, la luz es barrida desde un extremo a otro de la imagen, mientras que en aquél se produce un efecto *disolvente*, por así decir, sobre la luz, en virtud


FIG. 116. Mecanismo de doble obturación

(¹) Distribuída en España y Portugal por Western Electric, así como los cronos Century que también utilizan este sistema.

del cual ésta desaparece primero en las partes superior e inferior y después en el centro de la imagen proyectada, y al reaparecer, por el contrario, es el centro de la imagen el que aparece primero, extendiéndose luego hacia los bordes; cada obturador actúa sobre una mitad del cono de luz, y las sucesivas ondas de oscuridad no barren la pantalla en su altura total, sino que se encuentran en el centro de la imagen.

Finalmente, una tercera ventaja de este sistema es que no precisa un ajuste de obturación tan cuidado como con una sola pala. En la obturación normal es extraordinariamente importante que la luz sea cortada durante el período entero en que el movimiento intermitente arrastra la película. Esto puede lograrse por un ajuste preciso entre el obturador y el mecanismo de intermitencia. La relación entre estos dos dispositivos varía en la medida que los engranajes en el mecanismo proyector se desgastan, debido al juego del tren de engranajes. El mecanismo proyector debe, por consiguiente, estar equipado con un sistema que dentro de límites razonables permita el ajuste de la relación entre el obturador y el mecanismo de intermitencia.

El tipo de deformación que se presenta cuando no existe la adecuada relación entre los obturadores y el mecanismo intermitente, se conoce entre los americanos con el nombre de *travel-ghost* (fantasma viajero), y en España se dice: hay *desobturación*. Se observa, sobre todo, en la parte superior e inferior de la pantalla y también en los títulos o rótulos. Consecuentemente, el uso de doble obturador con su efecto disolvente, disminuye esta deformación opaca aun cuando la relación entre los dos dispositivos no sea correcta. El uso de un obturador de dos palas pequeñas para aumentar la luz transmitida no es aconsejable porque produce desobturación (1).

Finalmente, y para terminar, digamos que los proyectores de 16 mm Bell & Howell tipo Filmo tienen una relación de movimientos de 9 a 1 entre lanzadera y obturador, lo que reduce los períodos de oscuridad entre imágenes a $^1/_{160}$ segundos, anulando completamente el parpadeo; y algo análogo puede decirse de los Victor y Mitchell, siendo en general la eficacia de estos cronos mayor que los de 35 mm, porque su sistema de intermitencia permite aceleraciones y desaceleraciones mucho más rápidas que en estos últimos, lo que reduce el tiempo de tránsito de un cuadro al siguiente y con ello el de obturación.

c) **El sistema de alimentación y deslizamiento de la película.** Incidentalmente, hemos visto la necesidad de mantener un *bucle* de película delante de la ventanilla de proyección, para evitar que el mecanismo intermitente tenga que actuar directamente sobre todo el rollo de película que todavía no ha sido proyectado, el cual disminuye continuamente de masa, pudiendo ésta alcanzar, al principio de la bobina,

(1) Para el ajuste de la obturación y los efectos que produce cuando aquél no es preciso, véase mas adelante *los defectos de la proyección*.

valores considerables. También después de salir la película del rodillo de la cruz, o rodillo intermitente, se necesita disponer otro bucle, con la finalidad de que absorba las tensiones que en determinados momentos, cuando la película está en reposo, ejercería el rodillo de arrastre de la ventanilla de sonido, el que como es ya sabido debe tirar de la película con un movimiento rigurosamente uniforme; si no tomáramos tal precaución, tales tensiones se traducirían en un tipo particular de *flutter* en el sonido. Se precisa también que delante del rodillo intermitente y al pasar la película por delante de la apertura óptica propiamente dicha [1], aquélla se mantenga con un cierto grado de tensión y perfectamente plana y libre de cualquier tipo de movimiento. Finalmente, tanto en el bombo superior como en el inferior en que se va almacenando la película, la velocidad *lineal* de arrollamiento de ésta debe mantenerse constante, pero como el radio varía continuamente, no se podrá mantener constante la velocidad *angular* del eje, donde va arrollándose la película, y se necesita de un recurso que permita adaptar la velocidad angular al crecimiento del rollo; este recurso es, tanto en el bombo superior como en el inferior, un mando de fricción que permite al eje de la bobina donde se arrolla la película desplazarse por efecto de la tensión de la misma, con respecto al eje de giro de dicha bobina, ya sea éste fijo, como sucede en el bombo superior, ya sea rotatorio y con velocidad angular constante, como sucede en el bombo almacén inferior. En definitiva, contando de arriba abajo, nos encontramos con los siguientes elementos de tracción de la película o de apoyo de la misma: un eje fijo con acoplo de rotación por fricción sobre el que se coloca la bobina con la película; un primer tambor de alimentación que mantiene un primer bucle para la alimentación de película en la ventanilla y rodillo intermitente; una ventanilla de proyección por la que desliza bajo una cierta presión la película delante de la apertura, el rodillo intermitente de cruz, seguido de un segundo bucle de la película; un segundo tambor de alimentación que suministra película a un ritmo casi uniforme a la apertura de sonido o tambor cinético; un segundo rodillo de arrastre, que es al tambor cinético o apertura óptica lo que el rodillo de intermitencia es a la apertura de proyección, con la única diferencia de que aquí su velocidad angular debe ser rigurosamente constante además de las otras condiciones que daremos al tratar del *flutter;* un rodillo de retención cuya finalidad es mantener un pequeño bucle entre la salida de la película de la cabeza de sonido y el acoplo de fricción del bombo almacén, a fin de que no tire este acoplo de la película y pueda originar *flutter* por esta causa, y, por último, dicho acoplo a fricción en el eje

(1) Conviene distinguir ahora entre *ventanilla* y *apertura:* la última es una abertura fija en el crono con respecto al foco de luz y colector, de dimensiones precisas que daremos al tratar de los objetivos, y que constituye la sección mínima del haz de luz; la primera, en cambio, es ligeramente mayor y está constituída por todos los elementos necesarios para sujetar la película sin impedir un deslizamiento longitudinal en su propio plano, de dicha película.

en rotación del bombo inferior; vamos a dar una idea de cada uno de estos elementos.

Los dos elementos de fricción suelen estar constituídos por un disco de fibra bien pulimentado que se apoya sobre otro de acero también muy pulimentado, y solidario del eje, mientras que el anterior es fijo, estando apoyado sobre el de acero por un muelle cuya tensión se puede graduar; prácticamente no presentan ninguna particularidad especial.

Los dos tambores de alimentación tienen mayor diámetro que los rodillos intermitente y de sonido y llevan 32 dientes en su periferia. Ambos giran con velocidad uniforme, y ésta debe ser tal que absorba por segundo igual número de perforaciones que en el mismo tiempo abandona o recoge el rodillo intermitente; esto es, si llamamos N al número de revoluciones por segundo de cada tambor y recordamos que el de cruz da 6 r p s, se debe tener:

$$16 \times 6 = 32 \cdot N,$$

es decir, $N = 3$; por tanto, ambos tambores giran a la mitad de revoluciones que el de cruz, cosa natural si se tiene en cuenta que tienen doble número de dientes. De este modo, en cada $^1/_{96}$ segundos que el rodillo de cruz haga avanzar una imagen, o sea, 4 perforaciones, el tambor de salida hace avanzar a la película

$$32 \times 3 \times \frac{1}{96} = 1$$

diente; luego el bucle de película que hay entre el rodillo intermitente y el tambor inferior o de salida ha aumentado en $4 - 1 = 3$ perforaciones, en ese período de tiempo de paso de una imagen a la siguiente. Veamos ahora lo que se acorta mientras se proyecta la imagen siguiente, o sea, en $^1/_{32}$ segundos; como ahora el rodillo intermitente está quieto, lo que interesa es el número de dientes que avanza el tambor en ese tiempo, que son

$$32 \times 3 \times \frac{1}{32} = 3;$$

por consiguiente, mientras el rodillo está quieto, el bucle inferior se acorta el mismo número de perforaciones que se alargó durante el paso de la imagen, y, por tanto, en cada $^1/_{24}$ segundos la longitud del bucle permanece constante. Los mismos resultados se aplican al tambor de entrada, que es idéntico al de salida y gira a la misma velocidad. Resulta, pues, que ambos bucles deben tener una amplitud suficientemente grande para no ser absorbidos en el momento de reposo el inferior, o en el de avance de imagen el superior, dándoseles en general una longitud mucho mayor que aquella mínima. Interesa repartir cuanto sea posible el esfuerzo de tracción que ejercen los tambores y rodillos

sobre la perforación, lo que es tanto más fácil de lograr cuanto mayor sea el número de taladros que engranen en los dientes de aquéllos; a ello contribuyen en cierta medida aquellos bucles y ciertos rodillos guías que según el tipo de cronos se intercalan en el recorrido de la película. Además, y con la finalidad de que la película no se salga de los dientes que ejercen la tracción, ambos tambores llevan cada uno un patín de presión el cual va montado en un soporte desplazable que mediante un muelle mantiene la película en su sitio. Estos patines tienen una ranura en su contorno y en la que penetran los dientes del tambor, después de atravesar la perforación, pero en ningún caso deben tocar a dichos dientes, sino que deben girar por fricción sobre la película. Debido al menor diámetro del rodillo de cruz, éste lleva dobles patines para poder coger mayor número de perforaciones con la misma finalidad de repartir la tensión, cuestión aquí muy importante por los mayores esfuerzos que ha de sufrir la película, y por esta misma razón suele existir un vástago guía debajo y a la izquierda de dicho rodillo, con el fin de mantener el bucle entre ese vástago y el rodillo de cruz, para que recoja éste más perforaciones. Es también la razón de repartir la tensión entre mayor número de perforaciones, la que aconseja elegir los tambores de mayor diámetro, ya que otra solución que cumpliese no obstante el requisito de mantener los bucles, podría ser la de aumentar su velocidad sin variar el número de dientes.

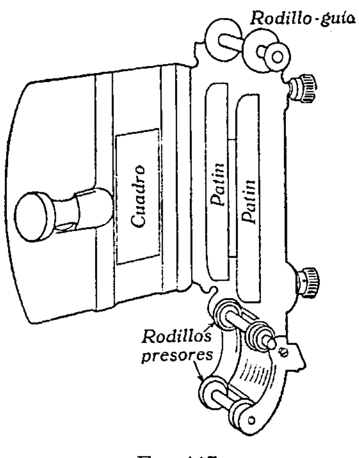


FIG. 117

La ventanilla de proyección. Una vez que la película es arrastrada en las cuatro perforaciones de una imagen por el rodillo intermitente, se precisa que la película quede frenada exactamente en esa posición hasta el avance de la imagen siguiente, y totalmente inmóvil delante de la apertura óptica; este frenado se consigue, en parte, sobre los mismos dientes del rodillo intermitente, y, en parte, manteniendo aprisionada por presión la película en la ventanilla que va delante de la apertura óptica.

Esta ventanilla está formada por un bastidor de fundición sobre el que se monta una placa-guía de acero que lleva en su centro una abertura rectangular, por donde se ve la apertura óptica del crono; esta placa-guía lleva en sus bordes verticales dos filetes salientes sobre los que resbala la perforación de la película y están perfectamente pulimentados a fin de facilitar tal deslizamiento. La placa-guía es intercambiable, e incluso, cuando se trata de material fotográfico muy fresco, en que se corre peligro de deterioro por interposición de cualquier residuo, pueden cubrirse las guías sobre las que resbala la pe-

lícula, con cintas de terciopelo impregnadas muy ligeramente en aceite muy flúido, con lo que aquel deslizamiento se hace más suave.

Mediante una charnela y un cierre adecuado se encuentra unida a la ventanilla la compuerta de cierre, la cual lleva en su parte interior dos patines, generalmente de madera o fibra, y también muy pulimentados, que cuando se cierra la compuerta aprisionan la película entre ellos y las guías de la placa-guía de la ventanilla; para ello, esos patines van empujados por muelles, cuya presión sobre los patines puede modificarse a voluntad. Tal compuerta lleva también una abertura rectangular para dejar pasar la luz proyectada. Por último, sobre la misma compuerta van fijados, en la parte superior, un rodillo guía que sirve para situar la película en posición adecuada con respecto a las guías de la ventanilla, y en la parte inferior los dos patines de presión del rodillo intermitente, los cuales al abrir la compuerta se separan del rodillo y permiten colocar la película. La figura 117 da una idea de cómo están dispuestas las distintas partes.

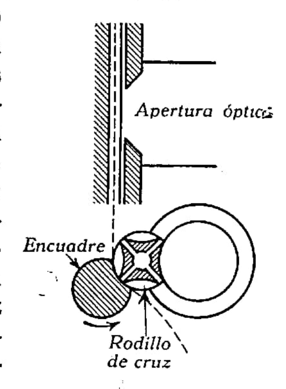
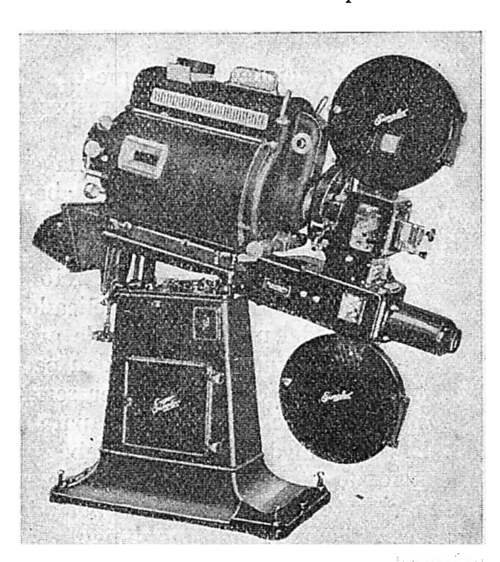


Fig. 118. Mecanismo de encuadre

d) **El sistema de encuadre.** No siempre la distancia que media entre la apertura óptica y el rodillo de cruz, contada sobre la película, es la conveniente para que una imagen quede perfectamente encuadrada en dicha apertura, y ni aunque así sea en un cierto instante, puede suceder que por contracción de la película o por un mal empalme, quede al cabo de un cierto tiempo dentro del campo de la apertura óptica parte de dos imágenes consecutivas, las cuales serán proyectadas simultáneamente en la pantalla con efectos desagradables; se precisa, pues, un mecanismo que permita, con el proyector en marcha, desplazar la posición de la parte de película que se encuentra aprisionada en la ventanilla de modo que se pueda encuadrar siempre una imagen en la abertura: éste es el *mecanismo de encuadre.*


Fig. 119. Pedestal Simplex, con equipo sonoro Western

Existen dos procedimientos generales para lograr tal cosa; el primero, consiste en desplazar todo el mecanismo de arrastre y alimentación del proyector, incluyendo ventanilla y rodillo de cruz, con respecto a la apertura, para lo cual se hace resbalar el conjunto de dicho mecanismo sobre unos carriles interiores a cierta presión, y a cuyo resultado contribuyen sin deterioro de la película los dos bucles que hemos dicho lleva la película en el proyector.

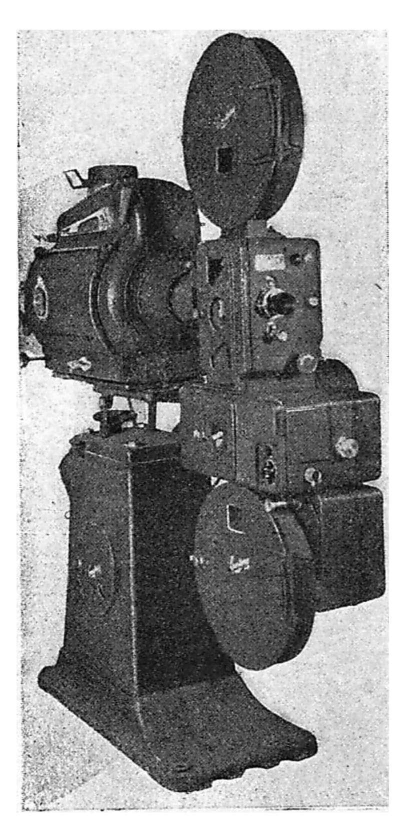


Fig. 119 bis. Máquina de postguerra tipo Westrex-Master

El otro procedimiento, más elegante y sencillo, consiste en avanzar o retardar, con respecto a la posición del rodillo intermitente, el momento en que el vástago de la excéntrica caza la cruz de Malta, y para ello es suficiente poder desplazar angularmente aquel rodillo de cruz con respecto a esta cruz, mediante un juego de engranajes que se maneja desde fuera por medio de un mando destinado a tal fin. Este sistema equivale a desplazar las perforaciones de las que tira el rodillo intermitente, con respecto a la apertura, y, por consiguiente, siempre se podrá llevar una imagen exactamente al cuadro de la abertura óptica (fig. 118).

Pedestal del proyector. Merece también una especial atención, puesto que todos los más delicados aspectos del mejor equipo de proyección de una cabina pueden perder su valor o al menos ser seriamente depreciados, si el aparato no está propiamente sustentado. El pedestal del proyector debe ser diseñado de tal modo que su centro de gravedad, cuando todo el equipo mudo y sonoro está montado, esté perfectamente soportado para evitar toda vibración y consecuentemente todo movimiento de la imagen proyectada. En este aspecto, debe tenerse en cuenta que durante los últimos diez años se han hecho amplios cambios en el equipo, haciéndole mucho más pesado y distribuyendo el peso de manera enteramente diferente, de tal modo, que solamente los modernos pedestales pueden asegurar resultados apropiados. Se deben tener facilidades para una cuidadosa alineación del equipo en la obtención de la mayor eficacia y también para que la imagen pueda ser fácil y

exactamente dirigida sobre la pantalla; en algunos casos, debe ser posible fácilmente utilizar dos pantallas con el mismo proyector, y entonces debe ser posible pasar de una a otra con facilidad y exactitud.

La figura 119 muestra una base o pedestal moderno que permite con facilidad todas esas funciones; en él se ve uno de los tipos de cabeza sonora Western de los últimos modelos, con linterna de alta intensidad y crono Simplex. La figura 119 bis representa una máquina completa de postguerra tipo Westrex-Master, lo más moderno en su género.

VIII. Objetivos de proyección

Condiciones generales

Hasta ahora hemos dado los elementos que determinan las características de las lentes que forman un objetivo, así como los defectos o aberraciones que suelen tener aquéllas. Un objetivo es, en general, un conjunto de lentes agrupadas para eliminar todas o algunas de aquellas deformaciones. Para un tal conjunto de lentes, se definen también unos planos de referencia llamados *planos principales*, que en las lentes delgadas coinciden con el plano de la lente, y unos focos principales que, en general, no están a la misma distancia de las caras exteriores del objetivo, en los dos sentidos que se pueden considerar en éste. La distancia entre cada plano principal y su foco se llama *distancia focal equivalente*, y desempeña idéntico papel que la de una lente, en cuanto a tamaño y posición del objeto e imagen.

Mientras los objetivos de aparatos ópticos permiten corregir las deformaciones de la imagen sólo en parte, pues otra parte se corrige mediante el ocular, en los de proyección y fotográficos todo debe ponerlo el propio objetivo; de aquí que sean los más difíciles de construir, y en lo posible deben eliminarse en ellos todos los tipos de aberración que dimos antes, es decir:

a) Supresión del astigmatismo.

b) Supresión de aberraciones esféricas y coma o penacho, que unidas a los fenómenos de difracción y grano de la película, tienden a disminuir el poder de definición del objetivo.

c) Supresión de la curvatura de la imagen, a fin de que todos los puntos de la pantalla aparezcan igualmente enfocados; esto es lo que muchos fabricantes quieren señalar cuando indican que el foco es agudo.

d) Supresión de la aberración cromática, al objeto de impedir que las imágenes aparezcan coloreadas o con halo en sus bordes.

e) Supresión de la deformación de la imagen, en cualquiera de sus dos formas.

Posteriormente daremos los modos de comprobar en qué medida los objetivos satisfacen a estas condiciones, pero de momento vamos

a ocuparnos de una característica de los objetivos que tiene gran interés porque define, en cierto modo, la calidad del objetivo y de ella depende directamente la cantidad de luz que pasa a la pantalla; nos referimos a su

Abertura relativa. Después del estudio que hicimos bajo Fotometría al tratar del flujo de luz que sale de un foco y recibe una pantalla, es evidente que una lente bañada por un foco de luz se comporta, en cierto modo, como un foco de luz para la lente situada inmediatamente después de ella, o para la pantalla sobre la que se recibe la imagen del objeto situado delante de la primera lente. Naturalmente, el tamaño de este foco ficticio depende de que la lente esté o no totalmente bañada por el flujo de luz que la atraviesa; y cuando no lo está, sólo se tomará como parte activa de la lente aquella que es bañada por el flujo de luz.

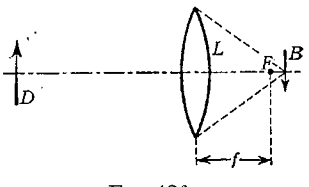


Fig. 120

En la figura 120, D es el objeto iluminado que actúa como foco de luz y que se encuentra alejado de la lente L. Ésta produce de D una imagen B, la cual tendrá una intensidad de iluminación, que, prescindiendo de la densidad de luz, dependerá del ángulo sólido bajo el cual se ve la parte iluminada de la lente desde B. Este ángulo, llamado ángulo de abertura o simplemente *abertura*, es más o menos grande según que B esté más o menos cerca de L. Pero cuanto más cerca esté B de L, tanto más lejos estará D de L, ya que B y L son conjugados respecto a L. Cuando D se aleja al infinito, B queda en el foco, y el ángulo sólido anterior adquiere el mayor valor que puede tomar. Como en los objetivos que vamos a usar, la imagen o el objeto se encuentra en las proximidades del foco, para caracterizar la cantidad de luz que recibe la imagen de la lente, o, como suele decirse, su *luminosidad o rapidez*, suele emplearse el ángulo bajo el cual se ve la lente desde el foco, o bien, puesto que el sistema es de revolución, su proyección plana. Este ángulo se da por la fracción D/f entre su diámetro D (llamado abertura libre) y la distancia focal, y se le llama *abertura relativa*. Por regla general, es D menor que f, y entonces se expresa ese cociente por la fracción $1 : n$, en la que $n = f/D$, y el objetivo tiene tanto mayor abertura relativa o es tanto más rápido o luminoso cuanto más pequeño es el número n. Los objetivos empleados en cine llegan hasta una rapidez de $1 : 1{,}6$, que son los más luminosos hasta ahora utilizados. Los americanos suelen emplear la notación f/n para indicar esa abertura relativa; así un objetivo $f/2$ es un objetivo en que su distancia focal f dividida por su diámetro vale 2, o sea, la distancia focal es doble del diámetro. Esta abertura es la *abertura libre*, como suele decirse en fotografía, pero es evidente que puede reducirse sin más que colocar un diafragma o pantalla junto a la lente de modo que el diámetro del cono de luz sea más pequeño, y entonces el número n

será más grande, obteniéndose así una abertura reducida f/n (esta operación se llama diafragmación). No debe confundirse la abertura relativa con la *apertura numérica* o simplemente *apertura*, de que hablaremos cuando estudiemos el objetivo de sonido, la cual vale, según allí veremos, $f/2n$. La mínima abertura útil en los objetivos de proyección suele ser $f/4,5$, pero entonces se obtienen pantallas poco iluminadas y, aun así, a costa de un gran foco, con el consiguiente mayor gasto en carbones y energía eléctrica; de aquí una de las razones de empleo de un objetivo muy luminoso que, aunque más caro, a la larga es más económico.

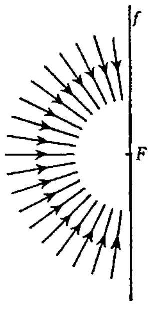


Fig. 121

Abertura máxima teórica. Prescindiendo de otras consideraciones, la máxima abertura se obtiene (fig. 121) cuando una superficie plana es iluminada por todo el semiplano de su izquierda, pero puesto que nuestra lente u objetivo tiene que satisfacer también a la condición de dar imágenes netas y fieles, se nos presenta el problema de hacer compatibles ambas condiciones. Se demuestra en óptica que para que se cumpla la condición segunda relativa a las imágenes, el sistema óptico debe cumplir con la famosa *condición de los senos;* frase un poco académica, pero que vamos a tratar de aclarar con su interpretación geométrica. La figura 122 representa un sistema de lentes que puede ser nuestro objetivo en cuestión, y en el cual sólo se han dibujado las dos superficies ópticas extremas, suponiendo que cumple con esa condición. I es la primera superficie de la lente, a través de la cual y paralelamente penetran los rayos de luz en el sistema, y II es la superficie a través de la cual los rayos le abandonan. La condición de los senos se cumple cuando los puntos de encuentro de los rayos refractados en el sistema, a la entrada y a la salida (exactamente sus prolongaciones dibujadas de puntos en la figura 122), se hallan en la superficie de una esfera de centro en el foco y cuyo radio es la distancia focal f (esta esfera aparece en el dibujo como un círculo) y su intersección con la cara II. La condición de los senos limita, pues, la abertura libre del sistema a un círculo de diámetro $2f$ como máximo, que sería el valor para aquel círculo cuando el foco estuviese en su superficie. En la figura 122 se ve fácilmente que las prolongaciones de los rayos que caen fuera de dicho círculo, tal como el X, no pueden cumplir aquella condición. Claro está que la mayor abertura relativa será entonces $f/0,5$ y la máxima apertura $f/1$; pero este tope en la práctica es imposible de alcanzar, habiéndose llegado en objetivos fotográficos o de proyección hasta $f/0,95$ para la abertura; el caso no es igual en objetivos de microscopio, a cuyo tipo pertenecen los de sonido de que después hablaremos.

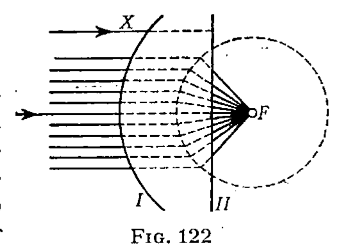


Fig. 122

Lentes cilíndricas. Pudiera creerse, teniendo en cuenta la disposición apaisada de la película, que el uso de lentes cilíndricas nos permitiría una mayor abertura, con todas las ventajas que esto lleva consigo; prescindiendo de su mayor coste de construcción, vamos a ver que existe siempre un sistema de revolución, lentes esféricas, que tiene una abertura equivalente y, por tanto, más barato y fácil de construir.

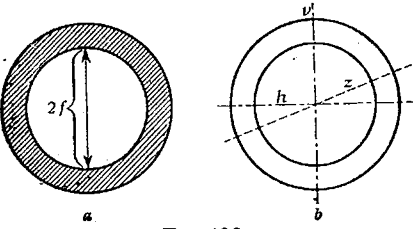


FIG. 123

Imaginemos en una lente u objetivo tal como el mostrado en la figura 123 *a* y *b*, un corte horizontal y otro vertical *h* y *v*, o bien, en otra dirección cualquiera, *z*. Si el sistema es esférico, todos los cortes son idénticos, pero si es cilíndrico, tendremos dos cortes principales: uno en el cual la acción de la lente es nula y otro en el que su acción es máxima, que son rectangulares y que vamos a hacer corresponder a *h* y *v* de la esférica; en ambos cortes tendrá la distancia focal, y, con ello, la abertura, distinto valor. Mientras que la representación de la abertura en la figura 123 era un círculo, aquí será una elipse. Esto sería ventajoso si esta elipse, tal como se ve en la figura 124 *a*, pudiera ser circunscrita al círculo que representa la abertura *f*/0,5; pero puesto que éste representa la máxima abertura, dicha elipse debe estar inscrita o ser interior al círculo mencionado. Si, por el contrario, el círculo representase una fracción de la máxima abertura, por ejemplo *f*/0,33 (fig. 123 *b*), entonces sería posible, mediante el uso de lentes cilíndricas, aumentar la abertura en una de sus direcciones hasta, por ejemplo, *f*/0,5. Pero si ello es posible en una dirección también, orientando convenientemente la lente cilíndrica, lo podríamos hacer en cualquier dirección, es decir, en todas, y entonces, dentro del círculo de radio *f*/0,5, quedaría inscrita la elipse de eje mayor *f*/0,5 que correspondería a una lente esférica. En resumen: *es imposible obtener mejores resultados con lentes cilíndricas que con esféricas en cuanto a abertura se refiere,* y compatible con la condición de los senos.

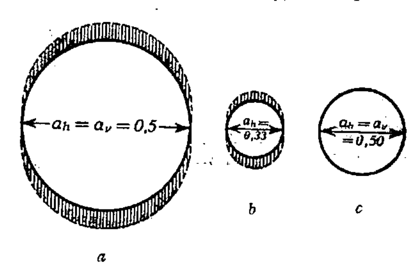


FIG. 124

Flujo de luz que penetra en un objetivo. Según hemos visto, la cantidad de luz o flujo que penetra en el objetivo depende del ángulo bajo el cual se ve su superficie activa (bañada por la luz) desde el foco. En posesión de la definición de abertura, podemos dar una expresión que nos permita calcular el flujo de luz que penetra en ese objetivo en función de su aumento lateral y de su abertura relativa.

Esta expresión es

$$\Phi = C \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \frac{1}{(1 + \beta)^2}$$

en la cual Φ representa el flujo, n el valor de la abertura y β es el aumento lateral del objetivo, es decir, la relación entre el tamaño de la imagen y el del objeto; C es una cantidad constante. Esta expresión nos indica que el flujo o cantidad de luz que penetra (el que sale ya vimos que es una fracción de éste, que depende de la naturaleza del vidrio y del número de lentes) o flujo de luz en un objetivo, *es inversa-*

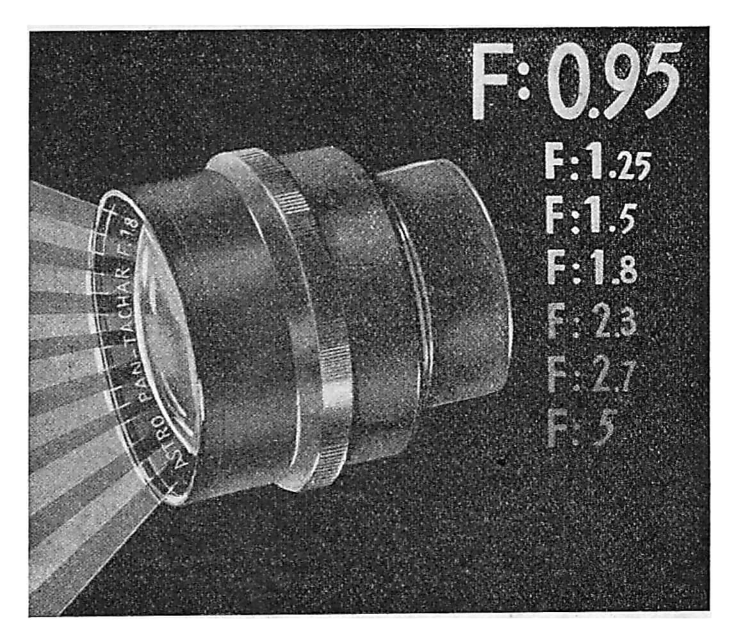


FIG. 125

mente proporcional al cuadrado de la abertura; se comprende ahora porque, a medida que disminuye n, se dice que el objetivo es más luminoso, ya que deja pasar mucha más cantidad de luz.

Se ve también que a medida que aumenta el tamaño de la imagen, o sea el aumento lateral, decrece el flujo y, por tanto, que cuanto mayor sea la imagen obtenida en la pantalla del cine (para igualdad de foco y objetivo) menos luminosa será la imagen proyectada.

Puesto que en el caso del cine el objeto, que es la película que se proyecta, tiene siempre el mismo tamaño, y el tamaño de la imagen, a la distancia fija a que se encuentra la pantalla, queda determinado por el foco del objetivo, o mejor dicho, por su distancia focal equivalente, si la iluminación en la pantalla es débil, no nos quedará otro

recurso para aumentar la luz sobre la pantalla que elegir otro objetivo de la misma distancia focal, pero de mayor abertura (prescindimos, naturalmente, de la solución de aumentar la intensidad del foco, lo que además de salir a la larga más caro, no siempre es posible, por la temperatura que entonces puede tomar la película). Naturalmente, dentro de esa condición de carácter puramente óptico, habrá de procurarse ver las posibilidades de alojamiento del objetivo en el portaobjetivos del crono, dado su mayor diámetro, y demás condiciones que examinaremos al estudiar en conjunto la iluminación de la pantalla. La figura 125, que no tiene valor absoluto y sólo sirve para tener una representación intuitiva de la ley relativa al flujo que sale de un objetivo, nos muestra cómo varía la iluminación con la abertura; se ve cómo van apareciendo cada vez más oscuros los números que representan las aberturas a medida que aumenta n. La figura 126 muestra dos objetivos de igual foco, y aberturas $f/4{,}5$ y $f/2{,}8$, trazados a igual escala.

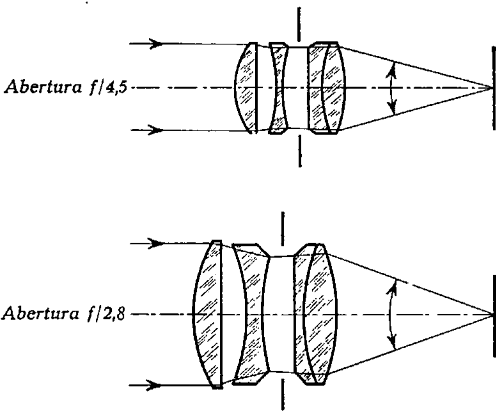


FIG. 126

Luz transmitida a la pantalla por el objetivo. Hemos dicho hace poco que el flujo de luz que sale del objetivo está ligado al que entra en él, por las relaciones indicadas bajo *Poder reflector y absorbente* y al final de *Dispersión de la luz.* Estas consideraciones, y de otra parte la constante C de la expresión antes obtenida, hacen difícil la determinación absoluta del flujo que sale de un objetivo en función del que emite el foco de luz y el que transmite el sistema colector formado por el espejo o condensador y lente de apertura, si la hay. Esto explica que sólo se puedan dar resultados comparativos sobre la eficacia de sistemas ópticos, lo que de otra parte tiene un interés práctico indiscutible. El uso cada vez más extendido de la película substandard de 16 mm en América, ha creado objetivos de proyección mucho más eficaces que los empleados con película normal de 35 mm. En general, los proyectores empleados de este ancho de película normal, especialmente los portátiles, suelen emplear aberturas de $f/4{,}5$ a $f/2{,}3$, y éste es el tipo corriente empleado en España hoy día, con algunas excepciones. En cambio, muchos proyectores de 16 mm usados en América, emplean aberturas entre $f/2{,}5$ y $f/1{,}6$, que son, por término medio, tres veces más luminosos que el equipo portátil equivalente americano y el equipo medio español de 35 mm, al menos 1,5 veces más luminoso que el mejor equipo de una sala de teatro americana. Esta lu-

minosidad adicional unida a la alta eficacia del mecanismo de intermitencia que, como vimos antes, tiene menos inercia y permite una más eficaz obturación y más rápidas aceleraciones y desaceleraciones, explica que se obtengan, con proyecciones de 16 mm, imágenes sobre la pantalla tan grandes como las que se obtienen con el mismo vatiaje, en equipos portátiles de 35 mm, y de tan buena calidad como las de muchos locales de segunda categoría. Los objetivos de 16 mm varían entre límites muy amplios; pero, cuando se trata de un servicio de garantía, puede decirse que el más rápido es de dos a tres veces más luminoso que el más bajo inferior.

Con finalidad industrial, para pequeños locales, el objetivo medio de 5 cm (2″) de foco suele tener una abertura media de *f*/1,65, pero cuando se trata de salas de gran longitud se pueden emplear objetivos de 3, 3 1/2 y 4 pulgadas (75, 90 y 102 mm) de distancia focal, con una luminosidad de *f*/2,7, que es 2 1/2 más lento que el objetivo anterior de 5 cm (2″), y *f*/1,65. Finalmente, en América, donde se hace proyección sobre coches camiones en tránsito, se emplean objetivos de más corta distancia focal y pantallas muy pequeñas, a fin de contrapesar la luz residual del día y otras perturbaciones que puedan llegar a la pantalla. Como resumen, la tabla adjunta nos da un estudio comparativo de los objetivos empleados más usuales en 16 mm, en los que la luz transmitida es relativa a la menor abertura para cada distancia focal, tomada como unidad [1].

Transmisión relativa de luz

Distancia focal. Abertura *f*/*n*	0,64 4	3/4 2,5	1 2,6	1 1/2 1,8	2 1,65	2 2,1	2 1/2 1,9	3 2,3	3 1/2 2,7
Flujo relativo de luz transmitida	1	2,5 1	2,4 0,9 1	5 1,9 2,1 1	6 2,3 2,5 1,2	3,6 1,4 1,5	4,4 1,7 1,9	3 1,2 1,3	2,2 0,8 0,9

Ejercicio. Se tienen dos objetivos de aberturas *f*/5,5 y *f*/4,5 y ambos de igual distancia focal *f*, y con el objeto en el mismo lugar con respecto a dicho objetivo; el primero da una imagen en un lugar en que el aumento vale 1, mientras que el segundo trabaja con un aumento de 0,5, ¿cuál es la relación entre los flujos de luz, esto es, en qué relación están las iluminaciones de sus imágenes, respectivas?

Para el primero

$$\Phi_1 = C\frac{1}{5{,}5^2}\cdot\frac{1}{(1+1)^2} = C\frac{1}{11^2}$$

para el segundo

$$\Phi_2 = C\frac{1}{4{,}5^2\,(1+0{,}5)^2}$$

luego

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{5{,}5^2\cdot 2^2}{4{,}5^2\cdot 1{,}5^2} = 2{,}65$$

[1] Véase Gil-Santiago, *Algunas ideas sobre la óptica del sonido y de la proyección en cinematografía*, «Metalurgia y Electricidad», año 1945, n.os 94-95 y 97 al 100, de donde se han tomado estos datos. Las distancias focales del cuadro anterior están expresadas en pulgadas; 1″ = 25,4 mm.

Tipos de objetivos de proyección

Es imposible, y tampoco es interesante, describir aquí en detalle cómo ha ido evolucionando la construcción de objetivos, a medida que iban apareciendo nuevos tipos de vidrios que permitían, en mayor medida, ir reduciendo las diversas aberraciones, y remitimos al lector interesado a nuestro trabajo antes citado. En cambio, puede ser interesante para el técnico que ha de trabajar con ellos, tener una idea clara de su constitución interior y de los grandes grupos en que se reúnen, para que si alguna vez se viera obligado a desmontarlos por no estar perfectamente limpios (lo que deberá evitar en la medida de lo posible, sobre todo si no tiene práctica y seguridad en la posición de las diversas lentes), tenga una idea de cómo van dispuestas dichas lentes.

Un nuevo tipo de objetivo de seis elementos (lentes) se ha lanzado al mercado recientemente, que hace posible una calidad en la proyección no lograda hasta aquí. Estos nuevos objetivos son más eficaces debido a un nuevo sistema de tratamiento de las superficies de las lentes que disminuye las reflexiones y elimina el halo que antes, con el otro tipo de objetivos, se proyectaba sobre la pantalla. Para obtener los mejores resultados, el objetivo debe tener una luminosidad $f/2$ y las superficies tratadas. $f/2$ es un objetivo muy rápido para cines, que puede trabajar en proyectores de cine del tipo standard 35 mm. Consideraciones de espacio hacen imposible emplear objetivos de una distancia focal superior a 5 pulgadas en esa rapidez, y en este tipo de mecanismos (proyectores). La gran rapidez, con seis lentes, asegura una eficaz transmisión de toda la luz lanzada sobre él a la pantalla, con una distribución tan uniforme como es posible. También existen en el mercado objetivos de cuatro lentes, con la misma velocidad o rapidez y sin superficies tratadas a favor de una gran economía en su coste para distancias focales superiores a 5 pulgadas.

Cuando, por las necesidades o condiciones del local, se precisa una distancia focal superior a 5 pulgadas (12,70 cm), la serie II, de cuatro lentes [1] y tamaño medio con las superficies tratadas, es recomendable; la rapidez de estos objetivos es algo menor que $f/2$, pero en aquellas condiciones dan los mejores resultados. Todavía existen objetivos más baratos con velocidades algo más bajas, en la serie I, tamaño un cuarto, de cuatro lentes para las más pequeñas distancias focales, en que es absolutamente esencial el mínimo coste; pero hacer esto es a cuenta de perder realismo. Es imposible, con objetivos de cuatro lentes, obtener una distribución tan uniforme de la luz, como la que puede ser lograda con objetivos más caros.

---

[1] Las designaciones Serie I, II y III son americanas y corresponden a un tipo de nomenclatura que explicamos más adelante.

Objetivos rectilineares y tipo Petzval. Son los más antiguos, y, de ellos, los primeros apenas se usan en cinematografía, mientras que los segundos son casi exclusivamente empleados en España. Los rectilineares están constituídos por dos *combinaciones normales*, simétricas con relación al diafragma, que va situado en el centro y que muchas veces lo constituye la propia montura. Estas combinaciones están formadas por dos lentes acromáticas pegadas, una convergente en *crown*, de índice bajo, y otra divergente en *flint*, de índice elevado; las lentes divergentes van colocadas exteriormente. La imagen es ortoscópica o libre casi de deformación, porque mientras una combinación da deformación con dilatación la otra la da con contracción, y se compensan; al mismo tiempo, se reduce el astigmatismo por volver ambas su concavidad al diafragma; hoy día han sido totalmente reemplazados por los anastigmáticos.

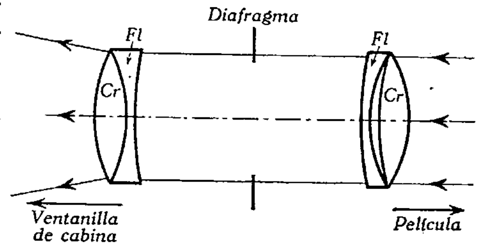


Fig. 127 Objetivo Petzval

Los objetivos Petzval o, como se llaman también, de *retrato*, son cronológicamente anteriores a los simétricos; no obstante lo cual, son hoy muy usados en cine, aunque la última tendencia en proyecciones de calidad es el uso de anastigmáticos semisimétricos. Están constituídos (fig. 127) de una combinación normal como los anteriores: el diafragma en el centro, para limitar el haz de luz, y dos lentes, una convergente y otra divergente, separadas entre sí. Las lentes divergentes de las dos parejas o dobletes van hacia dentro, al contrario que en los anteriores, y el par separado se coloca siempre hacia el interior del crono, pues este objetivo no es reversible. Posee una pequeña deformación, y la iluminación es inferior en la zona marginal de la imagen que en el centro. A este tipo pertenece el Kinostar, el Alinar y el Ernostar *f*/2 de Zeiss, y el tipo Cinephor de Bausch & Lomb. Es también el tipo más generalizado en nuestras salas de cine.

Objetivos anastigmáticos. Como su nombre indica, carecen de astigmatismo, y se han conseguido a base de *combinaciones anormales*, es decir, parejas de lentes cementadas formadas por una lente de *crown* y otra de *flint*, pero el *crown* de índice más elevado que éste, con lo que se pueden hacer compatibles las condiciones de eliminación de curvatura y acromatismo, que son contradictorias o imposibles con las combinaciones normales de vidrios. A este tipo pertenecen los *objetivos tipo Cooke*, muy empleados por los americanos, fabricados, entre otros, por Bausch & Lomb y casi exclusivamente empleados en los proyectores de 16 mm Bell & Howell. En la figura 128 se ve un objetivo de este tipo que consta de tres lentes separadas: la intermedia divergente en *flint* y las otras dos convergentes en *crown*, pero de

índice más elevado; no están equidistantes, y el diafragma deja una lente convergente, y la divergente del lado por donde sale la luz del objetivo, es decir, de frente a la pantalla. Si se desmonta, debe cuidarse muy bien de mantener la posición y curvatura de las caras. Esta combinación tiene el inconveniente de que no permite, como las combinaciones normales, una corrección tan cuidada de la aberración esférica; pero los objetivos que la llevan resultan muy suficientes para las salas de cine. Este tipo de objetivo pertenece al subgrupo de los *anastigmáticos asimétricos*, por contraposición a los *anastigmáticos simétricos*. Los anastigmáticos simétricos *tipo Goerz* (fig. 129) tienen, como su nombre indica, la curvatura de los dos meniscos exactamente iguales, y las dos mitades están formadas por tres o más vidrios de los que uno es un *crown* de índice elevado. De este modo, dando a cada mitad el aspecto de un menisco de curvaturas poco diferentes, se consigue satisfacer a la condición (de Petzval) necesaria, pero no suficiente para que la imagen sea plana. La aberración esférica longitudinal queda reducida a 0,5 mm aproximadamente, y el astigmatismo se corrige mucho mejor en virtud de la combinación anormal.

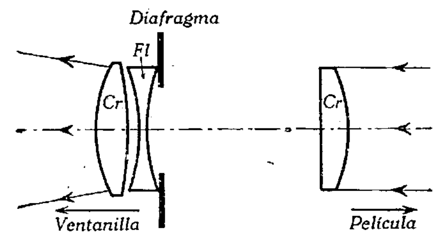
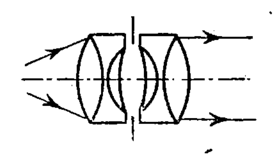


FIG. 128. Objetivo Cooke

Una variante de éstos son los *semisimétricos* en que las dos mitades son homotéticas o semejantes respecto al centro del objetivo; a este tipo pertenecen el «Kipronar» de Zeiss de $f/1{,}9$ y 100 mm de diámetro, el «Kenolite» serie III (diámetro 2-25/32″) de la casa Kollmorgen en distancias focales de 4-3/4″, 5″, 5-1/4″, 5-1/2″, 5-3/42″ y 6″, y el «Supercinephor» de Bausch & Lomb, los cuales se construyen con aberturas hasta de $f/1{,}3$ (fig. 130). Estos objetivos son especialmente interesantes para la proyección de película en color en que se requiere un mayor flujo de luz, aunque, naturalmente, deben ir acompañados de un eficiente colector de luz y un foco adecuado, pues de otra manera se pierden sus excelentes cualidades. Finalmente, y aun cuando no se han empleado aún en España, con el fin de disminuir en lo posible todas las pérdidas por reflexión que se originan en las superficies interiores aire-vidrio de las distintas lentes del objetivo, se recubren las superficies de las lentes en los objetivos lanzados últimamente al mercado por Bausch & Lomb, ya sean Cinephor o Super-Cinephor, con capas especiales transparentes de índice intermedio entre el aire y el vidrio (1), lo


FIG. 129. Doble anastigmático simétrico Goerz $f/3{,}5$

(1) Más exactamente su raíz cuadrada, para que el rayo reflejado en vidrio y el de la capa tengan sensiblemente igual intensidad, y si están en oposición de fase se anularán.

que produce una ganancia del 30% en el flujo de luz transmitido, lográndose con ello además de mayor cantidad de luz, mejor definición, mayor contraste y pureza en el color y más detalles en las partes en sombras.

La figura 131 da una idea de la diferencia entre dos objetivos idénticos, pero con y sin recubrimiento; la franja central negra representa

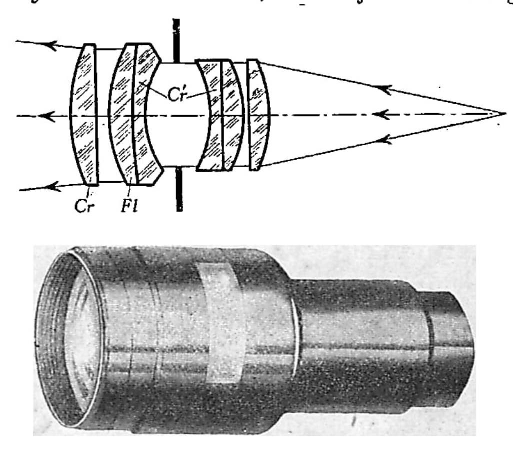
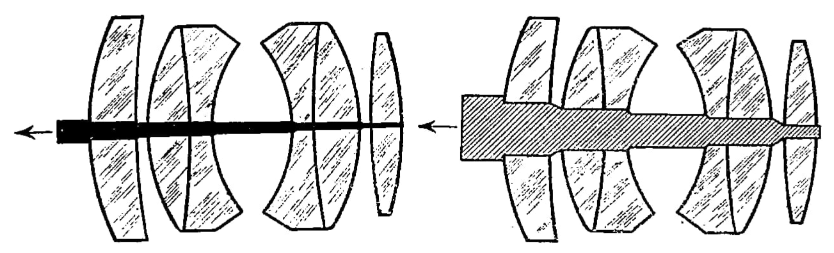


Fig. 130. Objetivo doble-anastigmático: Super-Cinephor (Bausch & Lomb) Kenolite serie III (Kollmorgen), $f/1{,}3$ = Luminosidad

la pérdida de luz relativa al área total, lo que equivale a la colocación de un diagrama en el centro del objetivo. Como dato curioso, la figura 132 muestra una escena de la película *Lo que el viento se llevó* vista a través de dos grupos de lentes; a la izquierda la cara de



$f/2{,}0$ con superficies recubiertas $f/2{,}0$ con superficies sin recubrir

Fig. 131

Scarlata O'Hara ha desaparecido bajo el efecto de varias reflexiones, mientras que a la derecha la del Dr. Meade es perfectamente visible en el círculo de la lente. En todos los objetivos, tanto simétricos como semisimétricos, hay sensiblemente ortoscopia y la deformación residual es con dilatación (1).

(1) La óptica Bausch & Lomb será distribuída en España exclusivamente por Western Electric, cuando las circunstancias de la guerra mundial permitan su importación.

Diámetros de las monturas de objetivos. Su conocimiento tiene cierto interés práctico para saber los que respecto a esta dimensión son intercambiables, aun cuando no sea un factor que gobierne la elección del objetivo, más que en cuanto a su adaptabilidad al crono y a su montura o portaobjetivos. En Europa, los alemanes, que son casi

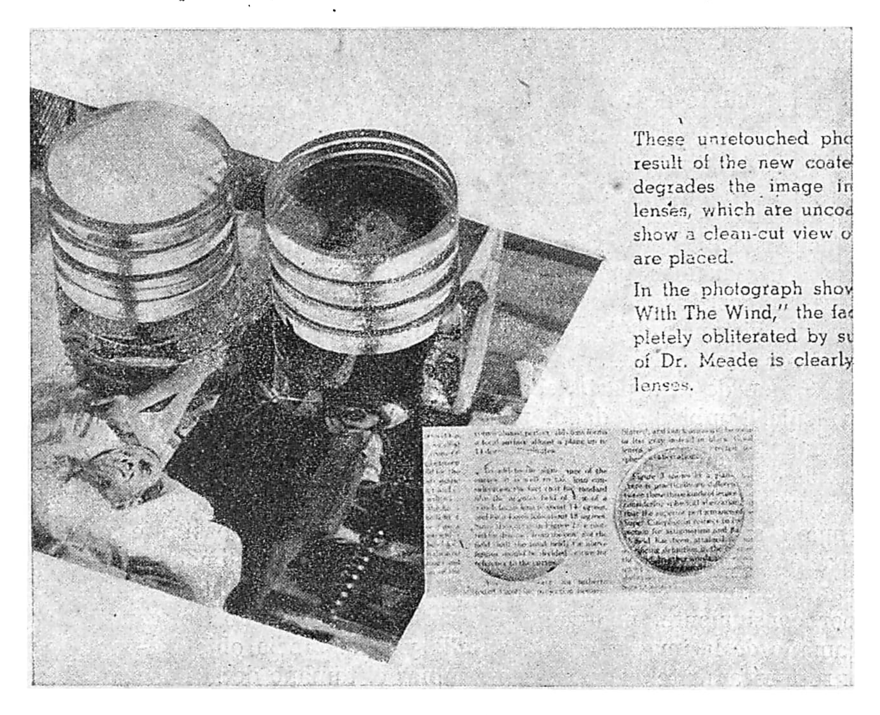


FIG. 132

exclusivamente (al menos en España) los que absorbían el mercado antes de la guerra, han establecido los diámetros 42,5, 52,5, 62,5, 80 y 100 mm, mientras que los americanos han establecido tres tipos standard: la serie I, tamaño en cuarto, de diámetro 1-15/16″; la serie II, tamaño medio, diámetro 2-3/4″, y la serie III, tamaño grande, de diámetro superior [1].

Marcas europeas de buena óptica, además de las citadas son: Emil Busch, Hugo Meyer y Astro, alemanas, y R. J. Beck y Ross, inglesas; americanas son Wollensak y Dallmeyer, aparte de otras de fama reconocida en otros tipos de aparatos de óptica, como Leitz, Goerz, Zeiss, etc.

---

(1) La serie I tiene distancias focales entre 3″ y 9″, la serie II entre 5″ y 9″, y la serie III entre 4″ y 6″ y aún mayores. Teniendo en cuenta la definición de abertura relativa, es evidente que dentro de los intervalos de distancias focales comunes, los de la serie I tienen menos eficacia en luz transmitida que los de la serie II, y éstos menos que la serie III.

Determinación de la distancia focal para un local dado. Los dos factores que determinan la elección de un objetivo de proyección son: su distancia focal equivalente (que de ahora en adelante llamaremos distancia focal a secas) y su abertura relativa; de la última acabamos de dar su definición, y de la influencia que tiene en la iluminación, y nos volveremos a ocupar al hablar de la iluminación y elección de la pantalla, mientras que ahora vamos a ver cómo se procede para determinar su distancia focal.

Tratándose de un local determinado o ya construído, es evidente que muy poco puede hacerse para variar la posición de la pantalla en el caso de que hubiese necesidad, ya que ésta sólo puede moverse en el reducido espacio del escenario que oscila entre tres o cuatro metros cuanto más; pero, en la mayoría de los casos, ni esto es posible, ya que o no existe escenario, y, por tanto, su posición es fija, o sus dimensiones son tan reducidas que ni aquel pequeño margen es posible; en definitiva, la posición de la pantalla es fija y, por consiguiente, también lo es la distancia de la pantalla al objetivo, contándose siempre desde el centro de aquélla.

Como, de otra parte, el objeto a proyectar, que es el cuadro de la película, también es dado, puesto que todas las películas tienen un tamaño tipo, ya sea éste el correspondiente a 35 mm, o los substandards de 16 mm, y aún de 8 mm, resultará que, si aplicamos las fórmulas que dimos anteriormente en la página 25 (las cuales son válidas, como a su tiempo indicamos, para los objetivos con bastante aproximación), una vez fijado el tamaño que debe tener la imagen sobre la pantalla, todo es conocido en esas fórmulas salvo la distancia focal, y, por consiguiente, podremos determinar ésta cuando se conozca el tamaño de la imagen en la pantalla y la distancia objetivo-pantalla; y recíprocamente es posible determinar el tamaño de la imagen sobre la pantalla, cuando se ha elegido un objetivo de distancia focal dada y además la distancia objetivo-pantalla, mediante las dos expresiones

$$y' = y\,\frac{f - p'}{f} \quad \text{y} \quad f = \frac{y\,p'}{y - y'}$$

y la convención de signos que dimos allí, o bien mediante las más usadas entre los técnicos de cine (todas las distancias positivas):

$$\boxed{y' = y\,\frac{p' - f}{f}} \qquad \boxed{f = \frac{y\,p'}{y + y'}}$$

puesto que aquí siempre la posición de la imagen con respecto al objetivo es la misma y no puede haber anbigüedad de signos; sin embargo, conviene hacer algunas observaciones para que la cosa no ofrezca duda alguna:

a) En primer lugar, debemos tener en cuenta que el largo y ancho de la película no es el mismo y que, por tanto, si queremos determinar

las dimensiones de la imagen en la pantalla, hemos de tomar en la expresión del aumento las correspondientes de la película, es decir, el alto de la imagen con el alto de la película, y lo mismo con el ancho, pues si no, los resultados son erróneos.

En la práctica tampoco se suelen emplear estas fórmulas, sino las aproximadas [1]

$$y' = y \frac{p'}{f} \quad \text{y} \quad f = \frac{y\,p'}{y'}$$

en las que se ha prescindido de f frente a p' en la expresión del tamaño de la imagen, y de y frente a y' en la de la distancia focal, por ser ambos valores relativamente pequeños y cometerse un ínfimo error.

b) Es evidente que para cubrir cualquier dimensión de imagen en pantalla y distancia objetivo-pantalla o *distancia de proyección*, como se suele llamar, habría necesidad de construir objetivos con una serie continua de distancias focales, lo que es impracticable y tampoco sería económico; por ello, los fabricantes de objetivos los construyen con distancias focales que van creciendo regularmente por pequeños saltos —por ejemplo, de $^1/_4$ en $^1/_4$ de pulgada ($^1/_2$ en $^1/_2$ cm), y entre dos márgenes para cubrir ampliamente los tamaños usuales en los tipos medios de locales—, y que si se requiere un objetivo con una distancia focal que no esté incluída en el cuadro de su fabricación, éste saldrá mucho más caro de precio, y si es posible, será más económico reducir un poco las dimensiones de la imagen, con el fin de quedarse con una de aquellas distancias focales tipo del constructor.

A tal fin, éste suele dar unas tablas de los objetivos que fabrica, en las que se indica en una horizontal la distancia de proyección y, en la primera vertical, las distancias focales fabricadas; donde se cruzan ambas líneas se nos dan las dimensiones de la imagen obtenida con tal foco y distancia de proyección; las últimas fórmulas antes dadas, sirven entonces, para encajar, por decirlo así, nuestro caso concreto en la tabla, determinando entre qué dos distancias focales y distancias de proyección nos encontramos, y, por consiguiente, cuál es la distancia focal tipo que debemos elegir y cuál será la dimensión exacta con que la obtendremos. No obstante, muchas veces ni siquiera se hace esta última parte, ya que puede construirse un recuadro negro que limita la imagen después de montada la pantalla, «hechando el foco» sobre la pantalla para ver y marcar el límite de la imagen.

A continuación damos algunas de las tablas más usuales en película de 35 mm:

---

[1] Es, pues, inexacta la afirmación hecha en la página 98 del libro de A. Robert, *Manual de proyección cinematográfica sonora*, de que estas segundas fórmulas dan una exactitud absoluta, pues ni siquiera las primeras que dimos antes son rigurosamente exactas si las distancias se toman a partir de la cara frontal del objetivo, ya que ésta no coincide con sus planos principales.

TABLA I. **Zeiss-Ikon.** Da las anchuras de la imagen en centímetros para película de 35 [1] mm.

Apertura de imágenes (ventanilla) 20,8 mm por 15,2 mm [2]

Distancia focal en cm		Distancia de proyección p' en metros																						
Cine	Día	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	45	50
3,5	15	299	358	418	477	538	597																	
4,2	18	249	299	348	398	447	498	597																
5,3	25	196	236	276	315	354	394	473	552	631														
6,0	25	—	209	244	278	314	348	418	487	557	627	697												
7,0	30	—	180	209	238	268	299	358	418	478	535	597	657	720										
7,5	30			196	223	251	278	334	390	446	502	557	613	668	725	780								
8,0	35			183	209	235	260	313	366	418	470	522	574	627	679	731	783							
8,5	35				195	221	246	295	344	394	443	491	542	590	640	689	738	782						
9,0	40				185	209	232	278	324	372	418	464	510	557	603	650	697	744	792					
9,5	40					198	220	264	308	352	396	440	484	527	572	615	659	703	748					
10	45					188	209	251	292	334	377	418	461	502	543	686	627	668	711					
10,5	45						198	238	279	318	358	398	438	478	517	558	597	638	677	738	756	800		
11	50						190	228	266	304	342	381	418	455	494	533	570	608	646	684	722	760	855	
11,5	50						181	217	254	291	327	364	400	437	472	508	534	581	618	654	691	727	818	
12	50							209	243	279	314	349	383	418	453	488	523	557	592	627	661	697	783	871
12,5	55							200	234	268	301	334	369	402	435	468	502	534	569	603	635	668	753	836
13	55							193	225	257	290	321	354	386	419	451	482	515	547	579	612	643	723	805
13,5	60							185	217	247	279	309	341	372	403	433	463	495	526	557	588	618	695	773
14	60							179	209	238	269	299	328	358	388	418	448	478	508	537	568	597	672	747
15	65								195	223	251	278	306	334	362	390	418	447	473	501	530	557	627	697
16,5	70								178	203	228	254	279	304	329	354	380	405	431	457	481	507	570	632
18	80									186	209	232	255	278	302	325	349	372	395	418	441	464	523	581
20	90										188	209	229	251	271	291	315	334	355	376	396	418	470	661

[1] En esta tabla, una vez conocida la anchura de la imagen, la altura se determina mediante una sencilla proporción: así, para un objetivo de 10 cm de distancia focal a 14 m de distancia de proyección, la anchura de la imagen es 2,92 m, es decir, aproximadamante, 3 m, y la altura valdrá

$$\frac{20,8}{15,2} = \frac{3}{x} \quad ,, \quad x = \frac{3 \times 15,2}{20,8} = 2,19 \text{ m},$$ o bien mediante la relación $y' = y \frac{p'}{f}$ con $y = 1,52$, $p' = 1400$ y $f = 10$, expresado todo en cm. La Tabla II de la página 97 del Manual de ROBERT (loc. cit.), no es utilizable hoy porque los tamaños corresponden al tipo antiguo de apertura de imágenes de 0,906″ × 0,6795″.

[2] En película muda, estas dimensiones eran de 23,5 mm por 17,5 mm. Esta última dimensión se conservó inicialmente en película sonora, pero actualmente se ha reducido a 15,2.

TABLA II. **Bausch und Lomb.** Da en pies (1 pie = 30,5 mm) el ancho y alto de la imagen, para una distancia de proyección en pies, y una distancia focal D. F. en pulgadas (1 pulgada = 25,4 mm)

Apertura de imágenes 0,825″ × 0,600″ (20,96 × 15'24 mm)

D. F. pulgadas	40 pies	50 pies	60 pies	70 pies	80 pies	90 pies	100 pies	110 pies	120 pies	130 pies	140 pies	150 pies
2,00″	16,4	20,5	24,6	28,8	32,9	37 0	41,1	45,3				
	11,9	14,9	17,9	20,9	23,9	26,9	29,9	32,9				
2,25″	14,6	18,3	22,,0	25,6	29,2	32,9	36,6	40,2	43,9	47,5		
	10,6	13,3	16,0	18,6	21,2	23,9	26,6	29,2	31,9	34,6		
2,50″	13,1	16,4	19,7	23,0	26,3	29,6	32,9	36,2	39,5	42,8	45,6	
	9,6	11,9	14,4	16,8	19,1	21,5	23,9	26,3	28,7	31,1	33,5	
2,75″	12,0	15,0	17,9	20,9	23,9	26,9	29,9	32,9	36,0	39,0	42,0	45,0
	8,7	10,9	13,0	15,2	17,4	19,6	21,8	23,9	26,1	28,3	30,5	32,7
3,00″	10,9	13,7	16,4	19,2	22,0	24,6	27,4	30,2	32,9	35,7	38,4	41,1
	8,0	10,0	11,9	14,0	16,0	17,9	20,0	22,0	23,9	25,9	27,9	29,9
3,25″	10,1	12,7	15,2	17,7	20,2	22,8	25,3	27,8	30,4	32,9	35,5	38,0
	7,3	9,2	11,0	12,8	14,7	16,6	18,4	20,3	22.1	23,9	25,8	27,6
3,50″	9,4	11,7	14,1	16,4	18,8	21,1	23,5	25,9	28,3	30,5	32,9	35,2
	6,8	8,5	10,3	11,9	13,7	15,4	17,1	18,8	20,5	22,2	23,9	25,5
3,75″	8,9	10,9	13,1	15,3	17,5	19,7	22,0	24,0	26,3	28,6	30,7	32,9
	6,6	7,9	9,6	11,1	12,8	14,4	16,0	17,6	19,1	20,7	22,3	23,9
4,00″	8,2	10,2	12,3	14,3	16,4	18,5	20,5	22,6	24,6	26,7	28,8	30,8
	6,1	7,4	8,9	10,4	11,9	13,4	14,9	16,4	17,9	19,4	20,9	22,4
4,25″	7,9	9,7	11,7	13,5	15,5	17,4	19,3	21,2	23,2	25,2	27,1	29,1
	6,0	7,1	8,5	9,8	11,2	12,7	14,0	15,4	16,8	18,3	19,7	21,1
4,50″		9,0	10,9	12,8	14,6	16,4	18,3	20,1	22,0	23,7	25,6	27,4
		7,5	8,0	9,3	10,6	11,9	13,3	14,6	16,0	17,2	18,6	20,0
4,75″		8,6	10,4	12,2	13,9	15,7	17,3	19,0	20,7	22,5	24,2	26,0
		6,4	7,6	8,9	10,1	11,4	12,6	13,0	15,1	16,4	17,6	18,9
5,00″		8,2	10,0	11,6	13,1	14,9	16,4	18,1	19,7	21,4	23,0	24,6
		6,1	7,2	8,4	9,6	10,8	11,9	13,2	14,4	15,6	16,8	17,9
5,25″		8,0	9,4	10,9	12,5	14,1	15,7	17,2	18,8	20,3	21,8	23,5
		6,0	7,0	7,9	9,1	10,3	11,4	12,5	13,7	14,8	15,9	17,1
5,50″			9,0	10,5	12,0	13,5	15,0	16,4	17,9	19,4	20,9	22,4
			7,5	7,6	8,7	9,8	10,9	11,9	13,0	14,1	15,2	16,3
5,75″			8,7	10,0	11,3	12,8	14,2	15,7	17,1	18,6	20,0	21,4
			6,6	7,6	8,3	9,3	10,3	11,4	12,4	13,5	14,5	15,6
6,00″			8,2	9,7	10,9	12,3	13,7	15,1	16,4	17,8	19,2	20,5
			6,3	7,3	8,0	8,9	10,0	10,9	11,9	13,0	14,0	14,9
6,25″				9,1	10,5	11,9	13,1	14,3	15,9	17,0	18,4	19,7
				7,0	7,7	8,6	9,5	10,4	11,4	12,4	13,3	14,3
6,50″				9,0	10,1	11,4	12,7	13,9	15,2	16,4	17,7	18,9
				7,1	7,7	8,3	9,2	10,1	11,0	11,9	12,8	13,7

c) Las dos tablas dadas anteriormente suponen que el *ángulo de proyección*, es decir, el que forma la horizontal con el eje del proyector (y, por tanto, del prisma de luz cuyo eje cae en el centro de la pantalla), es nulo; pero, evidentemente, en la mayoría de los casos en que las cabinas suelen estar en la parte alta del local, éste no es el caso; también sucede a veces que, por circunstancias especiales, la proyección tampoco se hace desde el eje de simetría longitudinal del local, sino lateral-

mente, aun cuando este caso sea poco frecuente. A menos de colocar la pantalla normal al eje de luz, y, por tanto, inclinada un ángulo con la vertical igual al ángulo de proyección, aquellas dimensiones dadas en las tablas anteriores ya no son correctas, ni tampoco, para el primer caso (ángulo de proyección no nulo), la altura dada por las fórmulas, o la anchura para el segundo (proyección oblicua con ángulo de proyección nulo). Suponiendo que la pantalla se mantiene vertical, tanto los valores de la altura encontrados en las tablas como los calculados a partir de las fórmulas, deben dividirse por el coseno del ángulo de proyección, pues las imágenes resultan ligeramente más altas, como se puede deducir fácilmente de una sencilla construcción geométrica [1]. Igualmente es la anchura la que debe dividirse por el coseno del ángulo de inclinación (formado por el eje longitudinal de la sala y el eje del proyector), tanto en las tablas como en las fórmulas, y por idéntica razón en el segundo caso. Cuando se dan las dos circunstancias, la imagen suele ser deformada, pues en lugar de ser la sección del haz de luz por la pantalla un trapecio, como en cada uno de los dos casos aislados, es ahora un rombo sobre el que las imágenes no suelen ser correctas aun cuando los ángulos anteriores sean muy pequeños. Si aquellos ángulos son muy grandes, también hay deformación; en los casos anteriores, *dilatación* o *ensanchamiento* de imagen respectivamente.

Para película de 16 mm, la tabla siguiente nos da la solución en la misma forma que la Tabla II lo daba para 35 mm

TABLA III. **Bell and Howell.** Da ancho de la imagen en pies y pulgadas, para una *f* en pulgadas y distancia de proyección en pies.

Apertura de imagen 0,284″ × 0,330″ (7,21 × 8,38 mm)

Dist. focal en pulgadas	Distancia de proyección (en pies)															
	8′	10′	12′	16′	20′	25′	32′	36′	40′	45′	50′	64′	75′	100′	125′	150′
	Anchura de la imagen															
0,64	4′8″	5′10″	7′0″	9′5″	11′9″	14′7″										
3/4	4′0″	5′0″	6′0″	8′0″	10′0″	12′6″										
1	3′0″	3′9″	4′6″	6′0″	7′6″	9′4″	11′11″	13′5″	14′11″							
1 1/2	2′0″	2′6″	3′0″	4′0″	5′0″	6′3″	8′0″	9′0″	10′0″	11′3″	12′6″					
2	1′6″	1′10″	2′3″	3′0″	3′9″	4′8″	6′0″	6′9″	7′5″	8′5″	9′4″	11′11″	14′0″	18′9″	23′5″	28′1″
2 1/2	1′2″	1′6″	1′9″	2′4″	3′0″	3′9″	4′9″	5′4″	6′0″	6′9″	7′6″	9′7″	11′3″	15′0″	19′8″	22′5″
3		1′3″	1′6″	2′0″	2′6″	3′1″	4′0″	4′6″	5′0″	5′7″	6′3″	8′0″	9′4″	12′6″	15′7″	18′8″
3 1/2		1′0″	1′3″	1′8″	2′1″	2′8″	3′5″	3′10″	4′3″	4′9″	5′4″	6′11″	8′0″	10′8″	13′4″	16′0″
4			1′1″	1′6″	1′10″	2′4″	3′0″	3′3″	3′9″	4′2″	4′8″	6′0″	7′0″	9′4″	11′8″	14′0″

[1] Una buena práctica, recomendada por Zeiss-Ikon, es mantener vertical la pantalla cuando aquel ángulo de proyección no excede de 5°; si el ángulo excede de ese valor, se compensará en parte aquel incremento en la dimensión de la proyección afectada, inclinando la pantalla un ángulo igual a la mitad del de proyección, en cuyo caso el incremento de dimensión se obtiene dividiendo por el coseno de la mitad de dicho ángulo. Sin embargo, cuando el ángulo de proyección excede de unos 15° no es recomendable esta práctica, pues aún así, la imagen aparece deformada para los expectadores próximos a la pantalla.

y como allí también se podrían calcular a base de idénticas fórmulas, pero teniendo ahora en cuenta que las dimensiones de la apertura del proyector son 0,284″ por 0,380″. El diagrama de la figura 132 bis puede en algún caso ayudarnos a resolver el problema; así, dado su objetivo de 5″ de f, si la distancia de proyección fuera de 30′, basta buscar sobre la recta oblicua que lleva de parametro las 5″ de distancia focal, el punto donde la corta la horizontal que empieza en los 30′ y por donde la corte, traza la vertical hacia abajo, lo que nos da 5′ para la anchura de la imagen, e igualmente se resolverían los demás problemas. Estas rectas se han trazado a partir de las fórmulas más simplificadas que dimos anteriormente.

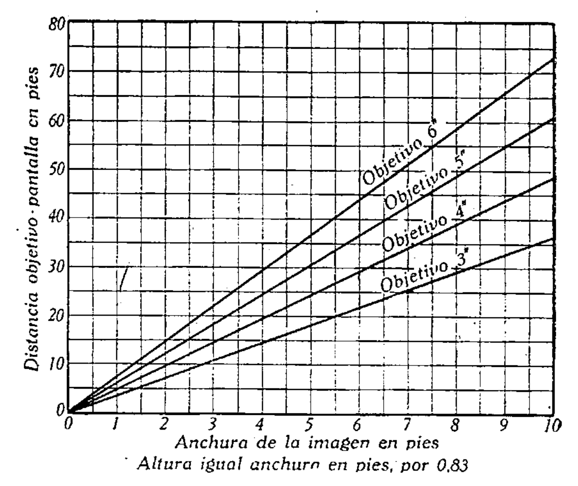


FIG. 132 bis. Curvas para determinar el tamaño de la imagen sonora a una distancia dada y con un objetivo también dado para equipos de 16 mm. Para imagen muda multiplíquese el ancho anterior de la imagen por 1,09 manteniendo la altura

d) Observando atentamente todas las fórmulas que hemos dado y las tablas anteriores, pueden sacarse una serie de conclusiones que convendrá tener presente en todo momento. En primer lugar, de las fórmulas aproximadas y a igualdad de las otras magnitudes, la distancia focal y el tamaño de la imagen varían sensiblemente en razón inversa, y, por tanto, cuanto mayor sea la distancia focal, menor será la imagen. Por consiguiente, como ya hemos dicho, elegiremos el objetivo de distancia focal inmediatamente superior, en las tablas, a aquel valor que el uso de la fórmula nos dé comprendido entre dos consecutivos; ello dará una imagen ligeramente más pequeña, pero mejor iluminada.

Hay muchos lectores que al observar las tablas I, II y III pensarán así: Puesto que para una distancia de proyección dada es posible elegir distintas distancias focales con distintos tamaños de imagen, sería más adecuado elegir, al contrario, la de menor distancia focal, porque así, si el tamaño de la pantalla lo consiente, se obtiene una imagen más grande; aparte de que una imagen muy grande hace perder al espectador la noción de la perspectiva que la escena trata de representar y de que pierde mucha iluminación para igual foco, hay la dificultad de que la imagen llega a tomar una magnitud tan grande que interviene el poder separador del objetivo y el grano de la emulsión de la película que se proyecta, y las imágenes aparecen borrosas o con

los bordes y contrastes apenas delimitados, y esto lo saben muy bien los aficionados a la fotografía, pues no es posible ampliar indefinidamente una fotografía, por muy correctamente enfocada y limpia que esté; la figura 133 da una idea de este defecto; en ella se ve el original, un aumento de ocho y un aumento de treinta veces, en el úl-

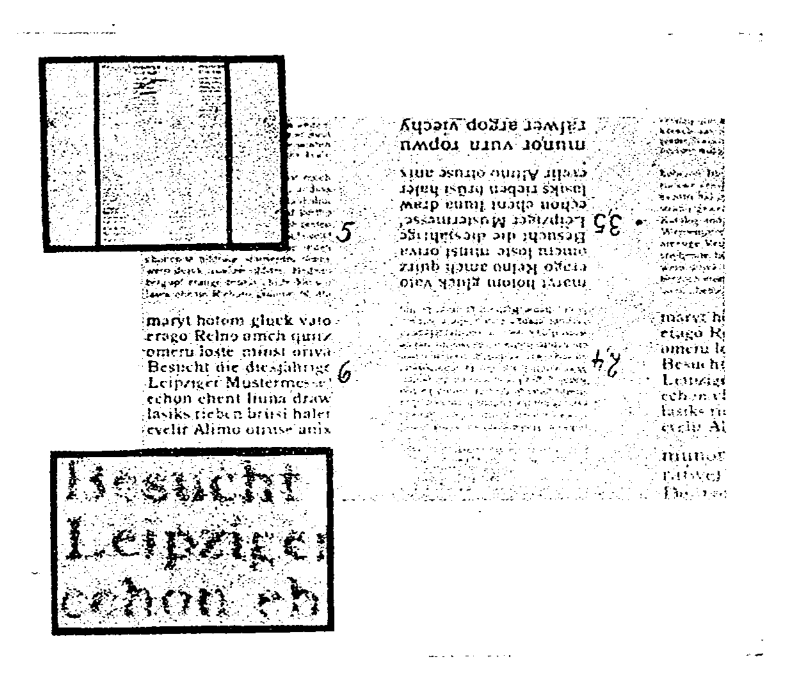


FIG. 133. Arriba, original; centro, aumento 8/1; abajo, aumento 30/1

timo de los cuales ya interviene el grano de la emulsión. Es ésta la razón que explica la especial disposición que adquieren las tablas que hemos dado en forma diagonal y que seguramente habrá asaltado la curiosidad del lector; en la parte superior derecha, todos los huecos sin cubrir corresponden a aumentos tan extraordinariamente grandes que las imágenes pierden toda definición aceptable.

Por el contrario, los espacios en blanco en la parte de la izquierda de la tabla corresponden a imágenes tan pequeñas que a la distancia a que serían observadas caen muy cerca del límite de agudeza visual media y, por tanto, requiere tal esfuerzo el observarlas que el espectáculo se convierte en una sensación dolorosa, incrementada, tal vez, por un exceso de brillo de la imagen. Esta elasticidad en la determinación del tamaño de la imagen y distancia focal se estrecha imponiendo otras condiciones convencionales, fruto de la experiencia media de locales en servicio, de que luego nos ocuparemos.

Objetivos para diapositivas. Corrientemente, las diapositivas se dibujan o fotografían en un cristal transparente, y aun cuando la apertura o tamaño a proyectar es muy irregular, el tipo normal establecido es de 8,5 por 8,5 cm; se les llama también *vistas fijas*. El objetivo no tiene que reunir ninguna cualidad especial, puede tener mucho menos abertura, puesto que su misión es secundaria y no necesita estar tan corregido como el de proyección; además, en razón de la transparencia del objeto, recibe mayor flujo de luz. La determinación de la distancia focal de éste se hace siempre a base de que la altura de las imágenes de la película y de la diapositiva coincidan, con lo que naturalmente su anchura nunca podrá cubrir toda la anchura de la proyección. Si ambos objetivos estuviesen a igual distancia de sus respectivos objetos y en la misma posición, la determinación de su distancia focal sería sencilla, pues como las imágenes serían entonces inversamente proporcionales a las distancias focales, bastaría escribir:

$$\frac{152}{850} = \frac{f_P}{f_F} \text{ ,, } f_F = \frac{850}{152} f_P \simeq 5 \cdot f_P \text{ } (f_P = \text{distancia focal de proyección});$$

pero las cosas no suceden así; la diapositiva suele estar más atrás que la película, y el objetivo de vistas fijas normalmente está muy adelantado hacia la pantalla con respecto al de proyección, por regla general; de aquí que en general ni se respeten las dimensiones de las diapositivas (lo que obedece más bien a un móvil comercial) ni se pueda utilizar la proporción anterior; la casa Zeiss da como regla que la distancia focal del objetivo de diapositivas debe ser 4,3 veces la del objetivo de proyección, valor que no difiere mucho del encontrado antes bajo aquellas hipótesis (¹).

Digamos, además, que el portaobjetivos de vistas fijas suele ir sobre un soporte desplazable con suficiente margen para lograr el ajuste de enfoque de una vez para todas. En la Tabla I de Zeiss se dan también los objetivos de vistas fijas adecuados o más convenientes para cada uno de los de cine y se ve que a pesar del consejo no se respeta escrupulosamente la condición de 4,3 veces el foco de la proyección.

La tabla de la página siguiente, muy empleada por los americanos para *Dialux*, permite resolver idénticos problemas que las anteriores, pero con aperturas de proyección de $2\,\frac{3''}{4} \times 3''$, es decir, unos $7 \times 7{,}62$ cm en lugar de las del tamaño europeo $8{,}5 \times 8{,}5$ cm. Dada la pequeña diferencia entre ambos tamaños y teniendo en cuenta el recuadro que forma la apertura en las diapositivas, es claro que esta tabla sirve sin gran error para los de tipo europeo.

(¹) Téngase en cuenta que la proporcionalidad no es exacta, por no serlo las fórmulas finales que obtuvimos en la página 165, de donde deriva esa supuesta proporcionalidad.

TABLA IV. **Best.** Para determinar objetivos de diapositivas con una apertura de proyección de $2\frac{3''}{4} \times 3''$ (7 × 7,62 cm).

Distancias focales en pulgadas; tamaños de imágenes, y distancia linterna-pantalla en pies

	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
6	6,0 7,3	8,9 9,8	11,2 12,3	13,5 14,8	15,8 17,3	18,1 19,8	20,4 22,3	22,7 24,8						
8	4,0 5,4	6,7 7,3	8,4 9,2	10,1 11,1	11,8 12,0	13,5 14,8	15,3 16,7	17,0 18,5	18,7 20,4	20,4 22,3	22,1 24,2			
10		5,3 5,8	6,7 7,3	8,0 8,8	9,4 10,3	10,8 11,8	12,2 13,3	13,5 14,8	14,9 16,3	16,3 17,8	17,7 19 3	19,0 20,8	20,3 22,3	21,8 23,8
12			5,5 6,0	6,7 7,3	7,8 8,5	9,0 9,8	10,1 11,0	11,2 12,3	12,4 13,5	13,5 14,8	14,7 16,0	15,8 17,3	17,0 18,5	18,1 19,8
14			4,7 5,1	5,7 6,2	6,7 7,3	7,6 8,3	8,6 9,4	9,6 10,3	10,6 11,5	11,6 12,6	12,6 13,7	13,5 14,8	14,5 15,8	15,5 16,9
16				4,9 5,4	5,8 6,3	6,7 7,3	7,5 8,2	8,4 9,1	9,2 10,1	10,1 11,0	11,0 12,0	11,8 12,9	12,7 13,8	13,5 14,8
18				4,6 5,0	5,1 5,6	5,9 6,4	6,7 7,3	7,4 8,1	8,2 8,9	8,9 9,8	9,7 10,6	10,5 11,4	11,1 12,3	12,0 13,1
20					4,6 5,0	5,3 5,8	6,0 6,5	6,7 7,3	7,3 8,0	8,0 8,8	8,7 9,5	9,4 10,3	10,1 11,0	10,7 11,8
22						4,8 5,2	5,4 5,9	6,0 6,6	6,7 7,3	7,3 7,9	7,9 8,6	8,5 9,3	9,2 10,0	9,8 10,7
24							4,9 5,4	5,5 6,0	6,1 6,6	6,7 7,3	7,2 7,9	7,8 8,5	8,4 9,1	9,0 9,8
26							4,5 5,0	5,1 5,6	5,6 6,1	6,1 6,7	6,7 7,3	7,2 7,8	7,7 8,4	8,2 9,0
28								4,7 5,1	5,2 5 6	5,7 6,2	6,2 6,7	6,7 7,3	7,1 7,8	7,6 8,3
30									4,8 5,3	5,3 5,8	5,7 6,3	6,2 6,8	6,7 7,3	7,1 7,8
32										4,9 5,3	5,4 5,8	5,8 6,3	6,2 6,8	6,7 7,3
34										4,6 5,0	5,0 5,5	5,4 5,9	5,9 6,4	6,3 6,8
36											4,7 5,1	5,1 5,5	5,5 6,0	5,9 6,4

	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
6														
8														
10														
12	19,3 21,0	20,4 22,2	21,6 23,5	22,7 24,7										
14	16,5 18,0	17,5 19,0	18,4 20,1	19,4 21,2	20,4 22,3	21,4 23,3	22,4 24,4	23,4 25,5						
16	14,4 15,7	15,3 16,6	16,1 17,6	17,0 18,5	17,8 19,4	18,7 20,4	19,5 21,3	20,4 22,3	21,3 23,2	22,1 24,1	23,0 25,1			
18	12,8 13,9	13,5 14,7	14,3 15,6	15,1 16,4	15,8 17,3	16,6 18,1	17,4 18,9	18,1 19,8	18,9 20,6	19,6 21,4	20,4 22,2	21,2 23,1	21,9 23,9	22,7 24,8
20	11,5 12,5	12,2 13,2	12,8 14,0	13,6 14,8	14,2 15,5	14,9 16,3	15,6 17,0	16,3 17,8	16,9 18,5	17,7 19,3	18,3 20,0	19,0 20,8	19,7 21,5	20,4 22,0
22	10,4 11,3	11,0 12,0	11,7 12,7	12,3 13,4	12,9 14,1	13,5 14,8	14,2 15,4	14,8 16,1	15,4 16,8	16,0 17,5	16,7 18,2	17,3 18,8	17,9 19,5	18,5 20,2
24	9,5 10,4	10,1 11,0	10,7 11,6	11,2 12,3	11,8 12,9	12,4 13,5	13,0 14,1	13,5 14,8	14,1 15,4	14,7 16,0	15,3 16,6	15,8 17,3	16,4 17,9	17,0 18,5
26	8,8 9,6	9,3 10,1	9,8 10,7	10,4 11,3	10,9 11,9	11,4 12,5	11,9 13,0	12,5 13,6	13,0 14,2	13,5 14,7	14,1 15,3	14,6 15,9	15,2 16,5	15,6 17,1
28	8,1 8,9	8,6 9,4	9,1 9,9	9,6 10,5	10,1 11,0	10,6 11,5	11,1 12,1	11,6 12,6	12,1 13,1	12,5 13,7	13,0 14,2	13,5 14,8	14,0 15,3	14,5 15,8
30	7,6 8,3	8 0 8,8	8,5 9,3	9,0 9,8	9,4 10,3	9,9 10,8	10,3 11,3	10,8 11,8	11,2 12,3	11,7 12,8	12,2 13,3	12,6 13,8	13,1 14,3	13,5 14,8
32	7,1 7,7	7,5 8,2	7,9 8 7	8,4 9,1	8,8 9'6	9,2 10,1	9,7 10,5	10,1 11,0	10,5 11,5	10,9 11,9	11,4 12,4	11,8 12,9	12,2 13,3	12,7 13,8
34	6,7 7,3	7,1 7,7	7,5 8,1	7,9 8,6	8,3 9.0	8,7 9,5	9,1 9,9	9,5 10,3	9,9 10,8	10,3 11,2	10,7 11,7	11,1 12,1	11,5 12,5	11,9 13,0
36	6,3 6,8	6,7 7,3	7,0 7,7	7,4 8,1	7,8 8,5	8,2 8,9	8,6 9,3	8,9 9,8	9,3 10,2	9,7 10,6	10,1 11,0	10,5 11,4	10,9 11,8	11,3 12,3

Los números de la primera horizontal indican la distancia linterna-pantalla, los de la primera vertical distancias focales, y los números en que se cruzan ambas líneas dan el tamaño de la imagen altura y anchura en pies.

IX. La pantalla

Consideraciones generales

Una alta calidad en la imagen proyectada depende de varios factores, entre los que se incluyen como más importantes: la intensidad de la luz reflejada, la distribución de la luz sobre la pantalla, la uniformidad con la cual la luz proyectada sobre la pantalla es reflejada sobre el área de asientos, el contenido de color de la luz, la cantidad de centelleo proyectada, la cantidad de oscilación del cuadro que se proyecta, la agudeza de foco sobre la imagen entera, y, en fin, otras varias circunstancias que iremos enumerando a su tiempo.

La observación de los efectos producidos por la luz reflejada en el espectador medio, ha demostrado que si la pantalla refleja demasiada luz, el ojo queda «sobrecargado»; la pupila se contrae, y se pierden las gradaciones de contraste. Cuando, por el contrario, hay poca reflexión, el ojo responde en sentido opuesto y la imagen se hace «plana», desapareciendo cualquier efecto estereoscópico que pudiera crearse mediante una adecuada iluminación. En ambos casos, el ojo se fatiga, y es bastante frecuente oír decir a la gente que el cine le produce soñolencia. Debe procurarse también que la iluminación producida por ambas máquinas sea lo más igual posible, pues no es infrecuente encontrar locales en los que la diferencia entre la iluminación de ambas máquinas alcance hasta un 50 % del valor normal.

En la cadena que forma la proyección de un sistema de cine hay un número de eslabones que tienen un efecto decisivo en la proyección, entre los que son los más importantes:

1. La pantalla.
2. Las aberturas de la cabina.
3. Los objetivos de proyección.
4. El mecanismo de obturación del proyector.
5. El mecanismo de movimiento intermitente.
6. El deflector de aire (si lo hay).
7. El foco de luz.

De todos los elementos que forman esta cadena del equipo proyector, después que éste ha sido pagado, instalado y ajustado, el es-

labón que más pronto cede es la pantalla. Cuando una pantalla ha sufrido una depreciación del 50 % de su eficacia original debe ser ciertamente reemplazada ([1]), porque la mitad del dinero que se gasta en carbones y energía para los arcos está siendo perdida, sin que los límites mínimos recomendados por la S. M. P. E. lleguen a lograrse y a cada uno de los demás eslabones citados debe dársele la consideración más completa, so pena de que la proyección sea ciertamente afectada. De cada uno de ellos nos hemos ocupado en su sección especial en el curso de esta obra, y nos incumbe ahora hacerlo con algún detalle del primero, es decir, de la pantalla.

El tipo de pantalla se determina teniendo en cuenta la forma de la sala o auditorio y el ángulo de proyección; el tamaño afecta a la densidad de luz por unidad de área; la naturaleza, estado y falta de limpieza de la pantalla afecta a la reflexión de la luz sobre la misma y, en consecuencia, se produce un aumento de consumo en el arco, para compensar tal disminución. La reflexión de una pantalla nueva oscila entre el 77 y el 85 %, pero debe tenerse en cuenta que la pérdida normal por año de una pantalla media suele ser de un 50 %, lo que representa una pérdida en consumo de los arcos, para unas diez horas de trabajo, de unas 75 pesetas al mes, suponiendo que se pague el kilovatio a 3,5 céntimos.

Por otra parte, el ajuste de colectores de luz y objetivos afecta al consumo de carbones y su limpieza a la eficacia en transmisión de luz. El tamaño y clase de carbón afectan también al consumo de éstos; los carbones gruesos aumentan el consumo de corriente y reducen el consumo de carbón, pero aumenta el coste de los carbones; por el contrario, carbones pequeños reducen el consumo de corriente y aumentan el consumo de carbones, pero la proyección es menos luminosa; por último, una desviación de carbones de unos 3,5 mm puede incrementar el consumo de corriente y carbón en un 10 %.

Tipos de pantalla

Hay dos tipos esenciales de pantalla empleados en los cines. El tipo más ampliamente empleado es la *pantalla difusora blanca*, que tiende a reflejar la luz tan uniformemente como es posible sobre un amplio ángulo horizontal de al menos 60° a cada lado de la normal ([2]). El otro tipo es el *tipo espectral* o *directivo*, que incluye las pantallas plateadas y las cristalizadas, las cuales en su mayor parte concentran el 71 % de

---

([1]) Según estadísticas realizadas por la S. M. P. E. en un gran número de locales, una pantalla pierde normalmente un 2 ó 3 % de su poder reflector por mes. Al final de los dos años se pierde así un 60 % de la luz incidente.

([2]) El albedo o factor de reflexión de estas pantallas no debe decrecer en más de un 10 % para ángulos de reflexión comprendidos entre 0° y 60° (Norma DIN 5031), para este tipo de pantallas.

la luz reflejada dentro de un ángulo de 35° a cada lado de la perpendicular; este tipo de pantalla es usado exclusivamente en teatros estrechos. Aumenta notablemente el brillo dentro del área normal de asientos y, por tanto, permite una gran calidad de proyección con focos pequeños en dichos locales.

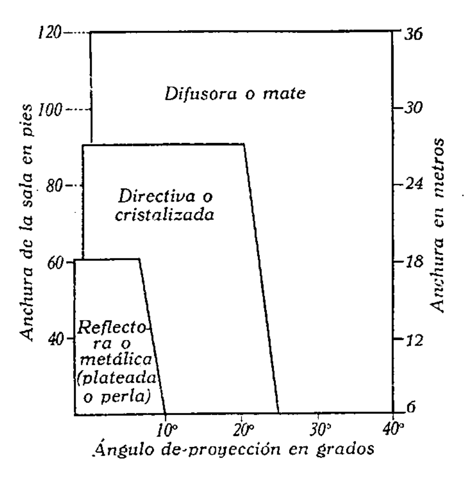


FIG. 134. Diagrama de selección de pantallas (cortesía de Electrical Research Products)

Antes de colocar una pantalla de cualidades directivas como las que acabamos de mencionar, debe considerarse cuidadosamente las posibilidades de éxito de la misma, atendiendo principalmente a la anchura del local. El diagrama de la figura 134 da una indicación del alcance de cada tipo de pantalla, atendiendo al ancho del salón y al ángulo de proyección.

La pantalla que más se aproxima a un difusor perfecto, es decir, que distribuye la luz igualmente en todas las direcciones, absorbiendo lo menos posible, sería una pared blanco-nieve que, según vimos, por ser comparable al papel blanco (Capítulo I, *Reflexión difusa*), puede asignársele un albedo del 90 ó 95 %; pero es evidente que tal pantalla sólo nos serviría para cine mudo; en su lugar se pueden emplear pantallas perforadas, de las cuales una disposición muy favorable es la representada en la figura 135, que además de tener la perforación en el sitio más adecuado a la transmisión del sonido procedente de los altavoces hacia la sala, tiene la ventaja de compensar en parte la caída de luz que del centro a los bordes poseen todas, en parte por no ser perfectamente uniforme el flujo de luz enviado por el objetivo de proyección. La figura 136 representa las características de varias pantallas según su tratamiento; en ella se da la variación del albedo o *factor de reflexión* con el ángulo y se confirma cuanto acabamos de decir respecto a la concentración de luz en un ángulo pequeño, por lo que están contraindicadas para locales relativamente anchos, en los que la más favorable es la tipo Z de la figura 136. En fin, todas las pantallas transparentes o perforadas en su totalidad pierden una cantidad más o menos grande

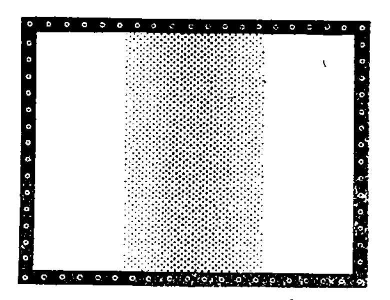


FIG. 135. Pantalla Even-Tone, Hurley-Dupont, de perforación gradual; utilizada por el Radio City Music Hall de Nueva York

de luz que pasa detrás, a través de ellas y que, por tanto, deja de reflejarse, por lo que su rendimiento es menor, en lo que a luz se refiere, que las pantallas continuas, aun cuando este defecto queda compensado por otras ventajas en lo que a sonido se refiere. En todo caso, una buena práctica sería que cada fabricante, al ofrecer una pantalla, nos diese a conocer su característica, tal como la de la figura 136. Un procedimiento seguido en algunos países de Europa, para determinar el factor de reflexión de la pantalla en el local, consiste en superponer a la pantalla del local cuyo estado de depreciación se quiere determinar, una serie escalonada de rectángulos tipos cuyos

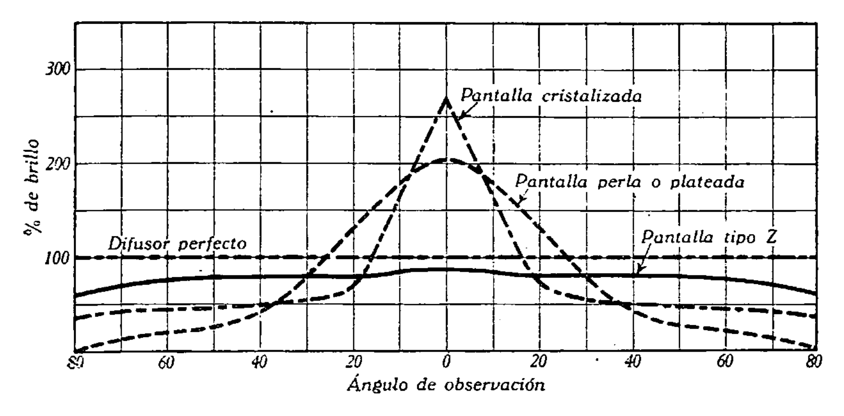


FIG. 136. Características de brillo de pantallas perforadas Da-Tone

factores se conocen, y después de lanzar el foco a la pantalla buscar entre ellos cuál es el que iguala con la pantalla cuyo factor será igual al de aquella muestra. Claro está que si se dispone de un fotómetro fotoeléctrico, dicha determinación puede hacerse mediante una serie de lecturas dirigidas hacia la pantalla y hacia el proyector, siempre que el fotómetro no tenga abertura por su parte posterior, colocándose a unos 30 cm de la pantalla. Esto nos dará la intensidad de luz reflejada a ángulo recto por la pantalla; la diferencia para varios ángulos puede deducirse de las curvas suministradas por el fabricante, como las de la figura 136. Por ejemplo, supongamos que en un tamaño standard de pantalla se obtuvo una lectura de 6 bujías-pie, con el fotómetro hacia el proyector, y 4,5 bujías-pie mirando a la pantalla; esto indica un factor de reflexión del 75 % a ángulo recto. Mirando una pantalla cristalizada bajo un ángulo de 10°, el espectador verá la imagen con una intensidad igual a $^{160}/_{270}$ de las 4,5, es decir, 2,67 bujías-pie. Esto representa la condición más pobre encontrada en proyección con una «calidad aceptable», aun cuando este término sea algo ambiguo, mientras no se den normas fijas, como veremos después. Puesto que el factor de reflexión de la pantalla no es estable, es costumbre hablar de brillo *inicial* de la pantalla, en

lugar de brillo de la pantalla en la *sala*. De este factor ya hemos dicho (Capítulo III, *Generalidades sobre el sistema de iluminación)*, entre qué valores se ha normalizado para 35 mm, mientras que para 16 mm se le impone el tope de 75 %, si bien con pantallas perforadas puede llegar a descender un 6 u 8 % más sobre ese valor, es decir, desciende al 67 ó 69 %.

Generalmente hablando, la vida de una pantalla plateada es más larga que la de una pantalla cristalizada, pues en ésta la cristalización se cae pronto y se convierte en un depósito de polvo.

Desde otro punto de vista, hay actualmente dos tipos de pantalla difusoras en el mercado americano: la de *superficie rugosa* y la *convencional de tipo plano*. La pantalla *plástica* rugosa, recientemente lanzada al mercado y que rompe su superficie en una tremenda multiplicidad de planos, tiene la ventaja de aumentar la ilusión de fondo en la imagen proyectada; sin embargo, los factores que afectan la eficacia de una pantalla en términos de su vida, merecen una gran consideración.

Una pantalla sin costuras es también preferible, porque éstas al cabo de poco tiempo se hacen oscuras y el espectador percibe pronto las costuras en la imagen proyectada. Igualmente es preferible una pantalla dura, porque se limpia mejor, y también es preferible sin agujeros perforados, porque cuando después de pintada la pantalla se perforan los agujeros, es muy difícil que no queden rebabas por detrás. Estas rebabas actúan como colectores de polvo, pero además actúan como una mecha; en el primer aspecto reducen con el tiempo la eficacia para la transmisión del sonido, y en el segundo producen hinchazones por absorción de la humedad y conducen a la rotura de la uniformidad de la pantalla, que se convierte en un captador del polvo y produce más rápidamente su deterioro. Las mejores pantallas tienen la característica de que su eficacia para la reflexión se deprecia en un 40 % aproximadamente, en un período de 2,5 años, mientras que muchas pantallas adquieren esa depreciación en menos de un año. La vida total de la pantalla puede ser, sin embargo, la misma.

Por otra parte, las pantallas se emplean bajo condiciones que no son particularmente favorables para el mantenimiento de una gran eficacia en la misma; muchos teatros emplean sistemas de acondicionamiento de aire inadecuados, que obligan a la salida de una gran columna de aire a través de la pantalla, arrastrando las impurezas de la atmósfera, polvo y el humo de los espectadores, lo que tiende a aumentar el deterioro de la misma. La luz ultravioleta lanzada por la proyección sobre la pantalla también afecta a ésta, y, por último, muchas veces se cambian los pigmentos empleados para la pintura de la pantalla, con el consiguiente cambio de color de la luz reflejada, bajo el pretexto de mayor realismo; pero casi siempre suele ser una equivocación, porque el color de la pintura usada debe guardar una relación fija con el color de la luz del foco.

Tamaño de la pantalla

Generalmente, los arquitectos suelen tomar en consideración las líneas de visión y ángulos visuales, y ambos factores son, desde luego, importantes para determinar el tamaño y posición de la pantalla. Usualmente existen, sin embargo, teatros con pantallas excesivamente grandes que disminuyen la cantidad de luz por unidad de área, y, como hemos visto, hacen perder definición a la imagen, aumentando el consumo de corriente con el aumento de foco, y aumentando también, como luego hemos de ver, la influencia de las oscilaciones de imagen, grano de la película, etc.

En el momento actual no hay un criterio fijo que permita determinar el tamaño más adecuado de la pantalla para un teatro dado. Los arquitectos se guían generalmente por la idea de que se ofrezcan líneas de visión satisfactorias desde los extremos del área de asientos. Un examen realizado en 1938 por la S. M. P. E. en, aproximadamente, 600 locales de todos los tipos, ha formado la base de los datos más ampliamente representativos de las condiciones generales de un teatro en los momentos actuales. Estas condiciones no deben considerarse en ningún sentido como ideales, pero son típicas de las condiciones medias que existen en teatros de antes de la guerra y que entran en un nivel comercial tolerable ([1]).

Características de teatros

	Límite inferior	50 % de teatros			Límite superior
		Mínimo	Medio	Máximo	
Relación de la máxima distancia de visión al ancho pantalla..	2,60	4,65	5,20	5,85	8,00
Relación de longitud a anchura área asientos	0,90	1,52	1,98	2,35	3,50
Relación anchura final asientos al ancho pantalla	1,00	2,50	3,00	3,50	6,20
Ancho pantalla	10′	16′	18′6″	21′	34′
Distancia suelo a parte inferior pantalla	3′0″	4′9″	5′4″	5′9″	8′2″
Ángulo de proyección	0°	5°	10°,5	15°	35°
Amperios (arco) por pie² de superficie de la pantalla	0,06	0,16	0,20	0,24	0,44

De todo ello se deduce que el criterio de un comprador de pantalla depende, en primer lugar, de la forma de la sala; en segundo lugar, de lo caro que esté dispuesto a pagar la mayor eficacia de la pantalla, con el mayor período de duración eficaz.

([1]) A veces se da como un criterio aceptable el ancho de pantalla igual a $^1/_5$ de la distancia de la última fila de asientos a la pantalla o bien que esté en la relación de 1 : 5′2 de la distancia de proyección.

Parecería a primera vista que el único criterio que debería guiar en la elección del tamaño de la pantalla es el de la iluminación; pero el examen del cuadro anterior nos muestra que no es así únicamente, y que son muy variados los factores que gobiernan la elección del tamaño de la imagen y, por tanto, de una pantalla; con el ánimo de seguir un criterio orientador que parece cada vez más extendido, vamos a resumir todos los aspectos del problema en los siguientes factores:

a) Perspectiva del auditorio.
b) Iluminación más adecuada de la pantalla.
c) Selección de objetivos por su eficacia en transmisión de luz.
d) Otros factores de cuantía difícil de evaluar.

Vamos a estudiar cada uno de estos factores, y a continuación daremos las normas standard relativas a la iluminación de pantallas y los métodos y aparatos empleados para tal fin:

a) **Perspectiva del auditorio.** La influencia de este factor queda determinada, según el criterio americano, por el cuadro dado anteriormente, o bien por una serie de curvas fruto de experiencias anteriores en locales en los que se ha podido comprobar una perspectiva confortable; estas curvas dan el ancho de la pantalla más recomendable, después de colocado el recuadro que limita la imagen naturalmente, y la altura de la misma en función de la longitud de la sala, y están fundadas en la distancia del observador a la pantalla. Estas curvas sirven o hacen referencia a un determinado tipo de equipo, y se puede decir que son propias de cada fabricante; una vez determinadas sus dimensiones, las tablas de objetivos que dimos antes nos permitirían seleccionar entre los varios posibles el objetivo más adecuado. El criterio reinante entre los constructores europeos, semejante en cierto modo al anterior, especifica que la longitud de la sala no debe exceder seis veces el ancho de la pantalla, y que el asiento más próximo a la misma no debe estar a menor distancia de un ancho de aquélla, encontrándose el asiento más favorable de 2,5 a 3 veces el ancho de pantalla; estas relaciones corresponden respectivamente a ángulos de 10°, 12° y 25°. Cuando el local posee balcón se dibuja un plano a escala, conforme se indica en la figura 137, trazando en la primera fila de anfitetaro una vertical de altura 2 m, que corresponde sensiblemente a un hombre puesto en pie, y sobre la última butaca, otra de altu-

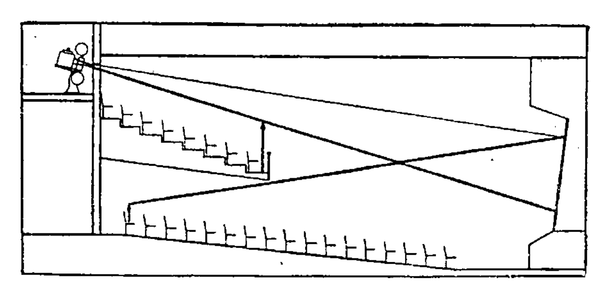


FIG. 137. Posición correcta de la pantalla

ra 1,25 m, y se marcan las líneas límites del haz de luz que sale del proyector de modo que toquen la flecha de la primera fila y la de la última, como se ve en la figura 137, de modo que ésta no sea interceptada por el piso de anfiteatro; la distancia obtenida en la pantalla será la altura máxima de la imagen; de este modo no es interceptado el haz del proyector y todos los espectadores ven cómodamente la pantalla; además, permite la localización más conveniente de ésta en el escenario.

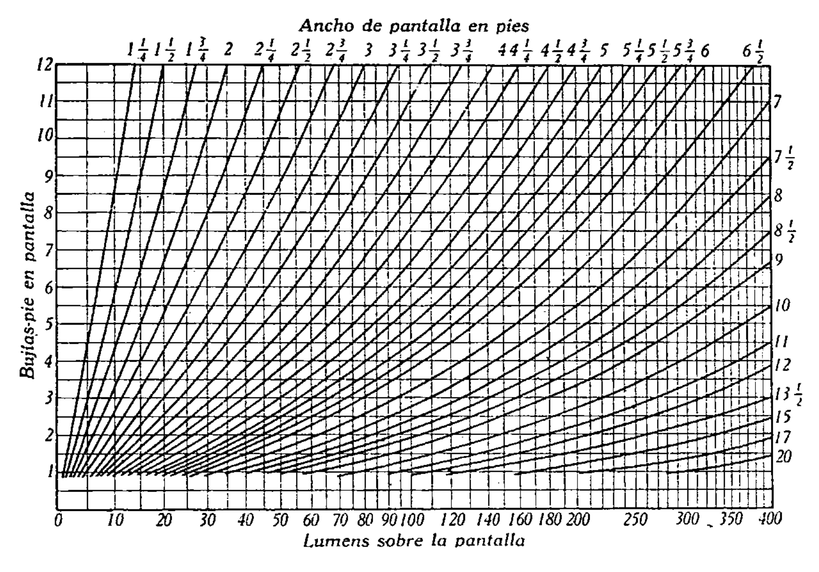


Fig. 138

b) **Iluminación de la pantalla.** Es éste un factor predominante, aunque no decisivo. Es evidente que un proyector dado puede dar excesiva luz. Colocando el proyector cerca de la pantalla o lejos de ella o empleando objetivos de distintas distancias focales, puede variarse el brillo de la imagen.

La intensidad en bujías-pie es función del tamaño de la pantalla, y puede dibujarse una serie de curvas tales como las de la figura 138, en la que se da el número de bujías-pie para un cierto número de lúmenes en la pantalla lanzados por el proyector y para cada ancho de la pantalla. Conociendo el número de lúmenes de salida del crono, es cuestión muy sencilla fijar el tamaño de la imagen para una determinada intensidad, si se trata de películas de 35 mm.

La principal *práctica recomendada* por la Society of Motion Picture Engineers ([1]), en relación con la proyección, se refiere a la cantidad

([1]) La Deutsche Kinotechnischen Gesellschaft ha establecido en Alemania una serie de normas tipo, semejantes en cierto modo a las que indicamos a continuación. Normas DIN 5031.

de luz que es reflejada por una pantalla. Se ha determinado que esta luz en el centro de la pantalla debe ser de 10 lamberts-pies, menos uno y más cuatro; es decir, entre nueve y catorce. El término más usado en relación con la intensidad de luz, es la bujía-pie, que es la cantidad de luz que cae sobre un área de un pie cuadrado de superficie reflectora, colocada a un pie de una bujía ordinaria. La luz incidente es la luz que es proyectada a través de la ventanilla de proyección en la pantalla, mientras que la luz reflejada es la luz reflejada por la pantalla.

Después que el equipo ha sido ajustado, es presumible que la luz incidente no haya variado en gran extensión, mientras que la luz reflejada depende enteramente de la eficacia de la pantalla en cada momento, que puede variar considerablemente. La luz incidente es medida en bujías-pie, y la luz reflejada en lamberts-pie. Así, la eficacia de la pantalla debe mantenerse dentro de límites convenientes de modo que en todas las condiciones el mínimo de luz reflejada sea aproximadamente de 10 lamberts-pie. En adición a esta práctica recomendada por la Society, todos los otros factores mencionados anteriormente deben de estar dentro de un intervalo tolerable con la práctica standard.

Claro está que para poder seguir esta práctica necesitaremos conocer, si queremos utilizar la figura 138, el factor de reflexión de la pantalla que, o bien es dado por el fabricante si la pantalla es nueva, o bien lo podemos determinar, conforme dijimos antes, con un fotómetro fotoeléctrico adecuado. Como la luminosidad de la pantalla varía del centro a los bordes, se comprende que se especifiquen aquellos dos topes, que los constructores europeos señalan, diciendo que la luminosidad no debe descender en el borde de la pantalla de un 75 % del valor en el centro.

Para proyectores de 35 mm, la S. M. E. P. establece, como hemos visto, topes para la luz reflejada por la pantalla, como elemento de juicio para juzgar de una buena proyección. Sin embargo, si lo que se quiere calificar es el sistema proyector, foco, colector y objetivo, entonces asigna una iluminación en pantalla entre 10 y 20 bujías-pie con obturador en marcha y sin película.

Refiriéndonos a películas de 16 mm, la experiencia americana indica que una intensidad de 6 bujías-pie es muy adecuada para proyección en blanco y negro, es decir, película no en color. Una intensidad de 6,9 bujías-pie se considera como *muy confortable,* con proyección de buena agudeza visual, mientras que una de 3,8 se toma sólo como *confortable* y *limpia;* por último, el comité de pantallas de proyección de la S. M. P. E. da preferencia a una iluminación de 7 lamberts-pie (para estas películas substandard de 16 mm) para el valor de la luz reflejada. El mismo comité ha aconsejado a los fabricantes la difusión de cuadros como el que damos a continuación que contiene los datos relativos a un determinado proyector, y que ayudarían a determinar la iluminación y tamaño de la pantalla.

Intensidad en bujías-pie de varios tamaños

Lúmenes	Tamaños en pies (anchura)						
	4	6	8	10	12	14	16
80	7	5					
100	9	8					
200		15	5	1,5			
400			8	5	3,7		
600					5,5	4	3,1
1000						7	5,2

El criterio europeo más representativo en este aspecto nos lo da la casa Zeiss-Ikon, la cual parte, para el establecimiento de la anchura de la imagen y de la iluminación de la misma, del flujo suministrado por sus arcos y de las curvas de la figura 139, referidas a estos arcos, trabajando en diversas condiciones de consumo y con distintas pantallas.

Los valores máximos de flujo luminoso de sus arcos con espejo se dan a continuación:

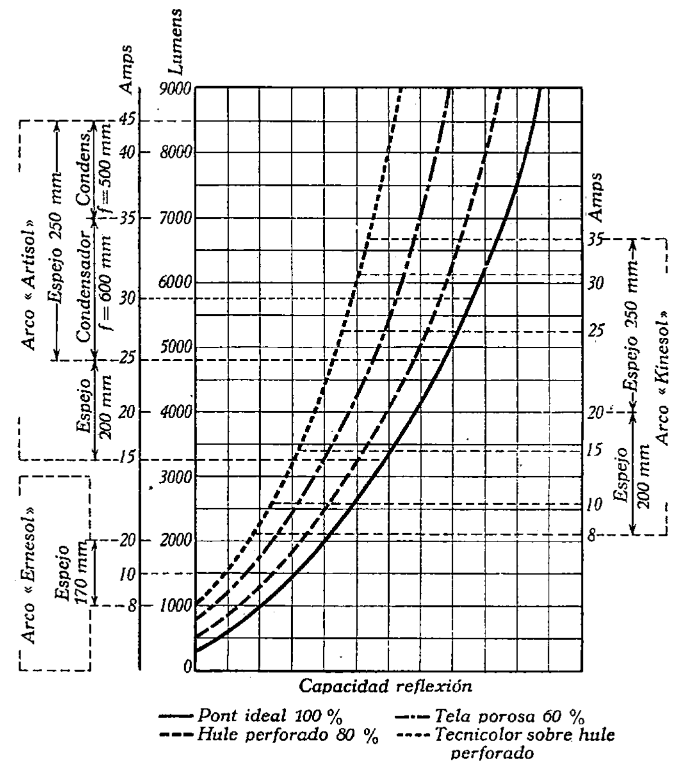
	Diámetro espejo	Consumo	Flujo en lúmenes
Arco «Ernesol»	170 mm	20 A	2 000
» «Ernesol» .... » «Kinesol»	200 »	20 A	4 000
» «Kinesol»	250 »	35 A	6 600
» «Artisol»	200 »	25 A	4 800
» «Artisol»	250 »	45 A	8 500
» «Artisol 75»	—	75 A	15 000

El arco *Artisol 75*, de alto rendimiento no aparece incluído en la figura 139, pero para él se consignan los siguientes datos:

Pantalla ideal	10,00 m	de anchura	de la	imagen
» hule perforado	9,0 m	»		»
» tela porosa	8,5 m	»		»
Película tecnicolor sobre pantalla hule perforado	7,5 m	»		»

El uso del diagrama de la figura 139 es como sigue: Supongamos que la anchura de la imagen es 6 mm; se parte del número 6 en la parte inferior del diagrama, y se sigue verticalmente hacia arriba. Si se trata de una pantalla ideal —pared blanca recién pintada—, se sigue hasta el cruce con la primera curva, que cae dentro del alcance de los arcos Kinesol y Artisol con espejo de 200 mm, pero fuera del Ernesol, que da flujo insuficiente. Para saber la intensidad de corriente a que debe trabajar el Kinesol, se va desde el cruce con la curva hacia la derecha, encontrándose así los 15 amperios de consumo. Si seguimos a la izquierda, se obtiene el consumo que correspondería al Artisol, con espejo de igual diámetro, que en este caso es el mismo.

Si la pantalla fuera de hule perforado, se sigue la vertical hasta en curva correspondiente a esa pantalla, y en el cruce horizontal está el alcance de los arcos, que en este caso deben trabajar a 20 A. Si la pantalla es de tela porosa, se vería que el cruce corresponde al alcance de los arcos Kinesol y Artisol con espejos de 250 mm; en este caso, el Kinesol deberá trabajar a 25 A y el Artisol a 27 A, por lo que resultará más económico el primero, a igualdad de otros factores.



Flujo de luz y corriente para anchura imagen 3-3'5 m. y diversos materiales pantalla.

Fig. 139. Rendimientos lumínicos de arcos espejo Zeiss-Ikon

Si se desea proyectar en tecnicolor y pantalla de hule perforado, se procederá igual en la curva correspondiente, lo que da el alcance del Artisol con espejo de 250 mm y consumo de 38 A. Por último, para mayores flujos de luz debe elegirse el *Artisol 75.*

Observación I. Aun cuando en este ejemplo hemos partido del ancho de la pantalla, se podría haber procedido partiendo del flujo o consumo en corriente, para llegar al ancho de la pantalla, que es problema que en este caso estamos desarrollando. Se ve también que estos datos son menos explícitos que los consignados anteriormente, y parecen más convencionales como referidos exclusivamente a los datos que

de los aparatos da el fabricante; pero es evidente que tienen por base un tope en la iluminación de la pantalla, resultado de la experiencia o quizá de medidas semejantes a las antes consignadas.

Observación II. En el sistema que indicamos de Zeiss-Ikon se prescinde por completo para la evaluación del ancho de la pantalla de la inestabilidad del factor de reflexión y es evidente que en el diseño de sus aparatos se ha asignado a éste determinados valores-tope, más o menos de acuerdo con la iluminación más correcta; esto explica, por qué en la mayoría de los locales que utilizan estos equipos no trabajan a los consumos especificados en la figura 139, sino con valores mayores; y no por defecto del sistema de proyección o mala elección de las dimensiones de la pantalla, sino por depreciación de la misma al disminuir su factor de reflexión. Si se quiere tener en cuenta el valor real en cada instante del albedo, se precisa seguir el procedimiento que antes hemos señalado.

Entonces se nos presenta una dificultad si además se quiere especificar las condiciones de consumo del foco; en efecto, la determinación del ancho de la pantalla, cuyo brillo-tope es aproximado a 7 ó 10 lamberts-pie, según el ancho de película, supone, después de tomar en cuenta el factor de reflexión de la pantalla, un cierto número de bujías-pie sobre la pantalla, y de él, un tope mínimo para el de lúmenes procedente del proyector.

Pero las condiciones de trabajo y consumo necesarias para que el crono dé un número determinado de lúmenes de salida, varía de unos tipos a otros según el fabricante, y depende, además, de las condiciones de obturación y del objetivo empleado, o más bien de la distancia de éste a la pantalla. Sólo los datos del fabricante nos pueden permitir elegir, como lo hemos hecho antes a partir de las curvas de Zeiss, cuál es el proyector con su foco más adecuado, y su consumo necesario para la pantalla determinada con las curvas de la figura 138, y de estos datos, si son sinceros, podremos decidir entre varios fabricantes cuál es el más económico desde el punto de vista del consumo del arco. Para dar tales datos, los constructores suponen generalmente un mínimo de 2,4 bujías-pie sobre la pantalla, y las condiciones varían según que la luz proyectada a la pantalla sea o no obturada; por término medio, un obturador suele absorber el 50 % de la luz que emite el objetivo sin obturación. Conviene aquí recordar lo que dijimos al hablar de la *doble obturación* (Capítulo VII). (Véase, además, más adelante normas de valoración de un sistema proyector).

c) **Selección de objetivos.** Como ya sabemos, la eficacia de un objetivo es inversamente proporcional al cuadrado de su abertura relativa, y, por consiguiente, una vez determinado el tamaño más aconsejable atendiendo a los factores *a)* y *b)*, sólo nos queda determinar su distancia focal equivalente para ese tamaño y su abertura relativa. Para el primer aspecto, nos podremos servir de las tablas que dimos al hablar de los objetivos, eligiendo, en el caso de que no esté

perfectamente encajado ese tamaño en aquellas tablas I, II y III, las D. F. que den un cuadro inmediatamente inferior al prescrito por *a)* y *b)*. Pero aun así, pueden existir varios objetivos o D. F. que den cuadros o tamaños de imágenes sensiblemente iguales en la pantalla; entonces, y al objeto de obtener el mayor rendimiento en lúmenes en la pantalla, se elegirá aquel que tenga mayor abertura relativa, es decir, para igual diámetro, el que tenga menor distancia focal, y para la misma distancia focal el de mayor diámetro. El cuadro que dimos en objetivos bajo *transmisión relativa de luz* podría prolongarse para distancias focales mayores, y nos permitiría decidir entre los dos en discordia de la tabla de objetivos en cuestión. Es evidente que las indicaciones de los fabricantes relativas a la salida de luz de un proyector determinado, deben especificar el tipo de objetivo con el que se da tal salida. Conviene tener en cuenta también aquí las observaciones que hicimos preliminares a los *tipos de objetivos de proyección*.

d) **Otros factores.** Entre éstos podemos citar: el nivel de iluminación en la sala, la densidad óptica de la película, el empleo de películas en color, el *flicker* o centelleo de la imagen, la estabilidad de la imagen, y el contraste visual y poder de resolución de detalles, entre los más importantes.

La eficacia del sistema de proyección depende en gran medida, en lo que a la observación de la pantalla se refiere, de la cantidad de luz extraña que hay en la sala y que cae sobre la pantalla juntamente con la luz de la proyección; esta luz disminuye el contraste y, por consiguiente, desmerece la calidad de la imagen; su origen puede ser de la sala propiamente y la luz difusa del proyector. La primera tiene su origen en los colores claros y brillantes de las pinturas empleadas en el decorado de la sala, los cuales deben evitarse en la mayor medida posible, y en todo caso procurar que las superficies donde son aplicados no estén enfrentadas con la pantalla; en el mismo sentido desfavorable intervienen las luces auxiliares rojas que generalmente se mantienen encendidas durante la proyección, para facilitar los movimientos de los espectadores durante la proyección. También difunde mucha luz el humo de fumar de los espectadores, en los locales que esto es permitido. Su evaluación se efectúa colocando una superficie negra de 10 por 10 cm, productora de sombra a unos dos metros de la pantalla y en el curso de los rayos del crono, y midiendo entonces la iluminación de la parte sombreada; esta superficie negra debe ser completamente opaca, y refiriéndola a la de la parte de la pantalla sin sombrear, el valor de esta relación no debe ser superior al 1 %. La luz difusa del proyector se debe en gran parte a que los objetivos no están perfectamente limpios y a las partículas que hay en suspensión en el aire dentro del cono de luz de proyección, cualquiera que sea su origen; su evaluación se logra colocando una superficie negra opaca de 2 mm de diámetro en la ventanilla del crono y midiendo la iluminación obtenida entonces en el centro de la mancha producida en la pantalla; la

relación entre ella y la de la pantalla sin sombrear nos dará en porcentaje la suma de luz perjudicial, por ésta y la causa anterior, y descontando el valor que obtuvimos antes, el % residual no debe exceder del 1 %.

La densidad óptica de la película afecta grandemente la cantidad de luz que del proyector alcanza la pantalla; es muy difícil establecer un tope para esta causa de pérdida, ya que los productores de películas no suelen tener en cuenta hasta ahora, y a pesar de las recomendaciones hechas, este factor para lanzar sus copias con densidades ópticas entre límites específicos.

La película en color es una nueva causa adicional que influye en la clasificación y elección de pantallas, puesto que el brillo de las mismas para este tipo de películas difiere naturalmente del que debe tener una pantalla para películas en blanco y negro ordinarias. Este brillo es generalmente más bajo para el color que para la película ordinaria debido al contraste de color que compensa en parte la pérdida de luz producida por la absorción de colores en la película. Los conceptos existentes de absorción de color, hasta hace poco reinantes, deberán ser modificados a partir del perfeccionamiento y extensión de los métodos Kodacromo, Agfacromo, etc., y la continua evolución del color no permite de momento establecer ninguna recomendación para el brillo deseable en la pantalla. Teniendo en cuenta la alta transparencia de la imagen actual en color y recordando la ganancia en agudeza visual debida al contraste de color, se puede aceptar el brillo de la pantalla que se utiliza para blanco y negro, pero con unas 8 ó 10 bujías-pie de intensidad. La tabla de la página 187, es una tentativa que está dando hasta ahora muy buenos resultados en 16 mm.

El centelleo de la imagen es, como hemos visto, función de la velocidad del proyector y de la extensión y número de obturaciones durante la proyección de cada cuadro. En general, mientras que la obturación en proyectores de 35 mm alcanza hasta el 50 o el 60 % de pérdida de luz, en los de 16 mm raramente excede esta cifra del 30 %, por lo que el efecto del centelleo es en estos últimos proyectores menos importante, y la menor pérdida de luz aumenta la agudeza visual notablemente si se tiene en cuenta el efecto Purkinje; el factor fatiga del ojo se hace mucho menor, lo que tiene bastante importancia en la elección del brillo de las pantallas. La estabilidad de la imagen es también mucho menor en 16 mm que en 35 mm; en aquélla es prácticamente desconocido el desajuste del momento de obturación, que origina, como veremos al estudiar los defectos de la proyección, los penachos de las imágenes, y otro tanto podemos decir de la oscilación de la imagen *(picture jump)*, que para una pantalla de 6 pies de altura puede alcanzar un valor tolerable de $^1/_4$ de pulgada, mientras que en 16 mm, para igual pantalla, queda reducida a $^1/_8$ de pulgada.

El contraste efectivo de una imagen, tal como es vista por el ojo, depende de todos los factores que intervienen en la proyección, y, por consiguiente, es muy difícil definir o especificar lo que pueda ser

un contraste visual aceptable; depende, en primer lugar, del color y de la intensidad de la luz, de que la película sea coloreada o que sea la imagen pintada de una película ordinaria, depende del grano de la película y del color y poder de resolución de la pantalla; este último factor depende de la distancia del espectador y del aumento de la imagen.

A continuación damos un tamaño recomendable de pantallas cristalizadas para 16 mm, para trabajar en conjunción con determinado foco y abertura de objetivos, en blanco y negro; también, y como ensayo de buenos resultados, se da el tamaño para película en color Kodachrome:

Vatiaje de la lámpara-foco	Luminosidad del objetivo: f/n	Tamaño de la pantalla	
		Para blanco y negro	Para color (vía ensayo)
1000	1,65	6 × 8 pies	5 × 7 pies
750	1,65	5 × 7 »	4 1/2 × 6 »
750	2,00	4 1/2 × 6 »	3 × 4 »
500	2,00	3 × 4 »	30 × 40 pulgadas
400	2,00	30 × 40 pulgadas	22 × 30 »
300	2,00	22 × 30 »	18 × 24 »

Estos tamaños sugeridos en el año 1938 por Bell & Howell se basan en una iluminación en la pantalla de 6 bujías-pie, con el proyector en marcha sin película y llenando los requisitos que indicaremos al hablar de las normas de valoración de un proyector. Los tamaños pueden doblarse en algunos casos especiales y se recomienda que el *jump* de la imagen en una de 6 pies de alto sea menor de 1/4″, y que la iluminación en los bordes o en cualquier punto de la pantalla no varíe respecto al centro en más de un 15 %.

Normas standard para la valoración de los lúmenes en la pantalla suministrados por un sistema proyector

Las partes que intervienen en la iluminación de una pantalla son: el arco o lámpara, el sistema colector de luz, el obturador simple o doble, y el objetivo de proyección y su eficacia o rendimiento, separadas y en combinación, determina la relación entre la cantidad de luz que alcanza la pantalla y la energía luminosa esférica total emitida por el foco de luz. La salida en lúmenes sobre la pantalla de un proyector es una medida de su capacidad de iluminación en la proyección. Esta salida se mantiene constante dentro de límites razonables, independientemente del tamaño de la pantalla. El procedimiento a seguir para obtener su valor es el siguiente:

1. Hacer la prueba con el crono marchando a su velocidad normal y sin película.
2. Comprobar que todos los sistemas ópticos están escrupulosamente limpios.

3. Emplear objetivo y sistema colector que se consideren como standard en el equipo.

Cuando se empleen otros objetivos distintos del standard (5 cm para cronos de 16 mm de d. f.), el proyector puede producir más o menos iluminación que con el equipo standard o usual, porque los objetivos especiales pueden ser de mayor o menor abertura y el sistema colector más o menos eficaz.

4. Usar una *lámpara calibrada* a su correcto voltaje, o un foco arco tipo con su consumo correcto.

Una lámpara calibrada es una que ha sido comprobada por su fabricante en cuanto a la eficacia de su funcionamiento a varios voltajes en relación con su tensión normal para que fué diseñada y en cuanto a sus horas de duración relativas a esas tensiones. Una lámpara calibrada puede trabajar a su tensión normal durante una prueba breve sin pérdida de cualidades, pero como las pruebas a veces duran más tiempo y se requiere más de una prueba, lo mejor es trabajar en las pruebas con la lámpara al 80 % de su tensión normal, con lo que las lecturas en bujías-pie deberán multiplicarse por el factor de conversión de la lámpara en cuestión. El voltaje exacto y el factor de conversión se dan por el fabricante y suelen estar escritas sobre la misma lámpara.

Cuando se trata de arcos es conveniente mantener en todo lo posible las condiciones de trabajo del mismo, en cuanto a la separación de carbones, ajuste del reflector o condensador, naturaleza y diámetro de aquéllos, etc., y también el consumo en amperios a que se hace la prueba; en general se harán varias pruebas con otros tantos consumos.

5. Utilizar un tamaño de pantalla tal que se obtengan lecturas de 6 a 10 bujías-pie para 16 mm y de 10 a 20 bujías-pie para 35 mm. Esto tiende a eliminar errores en las lecturas del fotómetro.

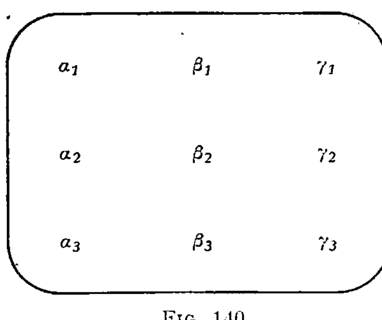


FIG. 140

6. Cuando se trate de 35 mm tomar nueve lecturas del fotómetro en los puntos marcados en la figura 140; si se trata de 16 mm, sólo se tomarán cinco lecturas; prescindiendo de las α_1, α_3, γ_1 y γ_3 de la anterior figura.

Sobre el número de lecturas necesarias, no existe aún hoy un criterio uniforme, habiéndose llegado hasta aconsejar lecturas en 256 puntos de la pantalla; la media de una lectura con 5 puntos en un caso determinado fué de 10,0 bujías-pie *(b/p)*, mientras que con 5 lecturas esa media fué de 8,6 *b/p*, pero la experiencia indica que la media de los 9 puntos tan extendida en equipos de 35 mm da valores más bajos que los realmente obtenidos en la práctica. Estas lecturas no sólo indican la luz incidente, sino que, además, podemos determinar

la uniformidad del flujo de luz recibido, hallando la relación entre la media de las lecturas en el borde y la lectura en el centro, contadas a lo largo de una vertical; la diferencia es mucho más sensible a lo ancho que a lo largo, por cuya razón se toman verticales. Las lecturas se hacen colocando el fotómetro plano sobre la pantalla y mirando al proyector; el *factor de homogeneidad* vale

$$x = \frac{\dfrac{(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)}{2}}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}$$

y no debe ser inferior al 80 % para una buena calidad, pudiendo admitirse un tope mínimo del 75 % para cronos de 35 mm. Para 16 mm, la lectura en el centro no debe ser superior en más de un 15 % a las de los otros puntos marginales.

7. Hallar la media de las nueve o las cinco lecturas respectivamente. Para focos de lámpara (16 mm película) multiplicar la media de las cinco lecturas por el factor de conversión de la lámpara, si fuera necesario.

Cuando la lámpara trabaja a tensión más baja que su voltaje normal, se precisa multiplicar por el factor de conversión para obtener el valor a la tensión normal de trabajo. Como hay gran variación en la distribución de la energía según el color, para dos tensiones distintas en una misma lámpara y aun para lámparas de distinto fabricante, encontramos en ello una razón más a la necesidad de que el fotómetro vaya provisto en todo caso de un filtro llamado *Viscor*, para adaptar su sensibilidad a la curva de sensibilidad del ojo humano que dimos en la figura 29. En otro caso, se precisarían correcciones por este concepto.

8. Deducir la iluminación residual o parásita de la sala en la región de la pantalla.

Si para hacer la prueba se dispone de una sala de paredes negras, no es preciso hacer ninguna deducción, pero, para el caso contrario, ya hemos indicado la manera de evaluar este factor y sus tolerancias al tratar del *tamaño de la pantalla*, en el apartado *d*) *Otros factores.*

9. Multiplicar por un factor representante de la eficacia media de la lámpara por su período de vida el valor así reducido (sólo para proyectores que utilicen tales lámparas).

Como la salida de una lámpara en flujo de luz decrece continuamente durante su uso, la salida media durante el período de vida de la misma constituye la mejor medida de su poder luminoso. Esta caída es debida al progresivo ennegrecimiento de la ampolla de vidrio y al gradual aumento de resistencia eléctrica, porque el tungsteno se evapora de la superficie del filamento. Para una duración media de 25 horas (3300° K aproximadamente), que es la normal en los tipos preeminentes de lámparas, la salida media es de un 86 % del valor para la lámpara nueva en las lámparas de filamento biplano, y de

un 96 % en las de filamento monoplano; estas cifras son aproximadas, y el tanto por ciento varía con el tipo de lámpara.

10. Multiplicar por el área de la pantalla el valor reducido así obtenido (en pies cuadrados, un pie lineal = 30,5 cm) para obtener los lúmenes sobre la pantalla.

Este valor representa una verdadera medida de la iluminación media de la pantalla, y la capacidad media de iluminación de la lámpara durante su período de vida para las lámparas. Si se compara con la salida esférica total en lúmenes del arco o de la lámpara (también la media en su período de vida), se obtiene la eficiencia del sistema proyector.

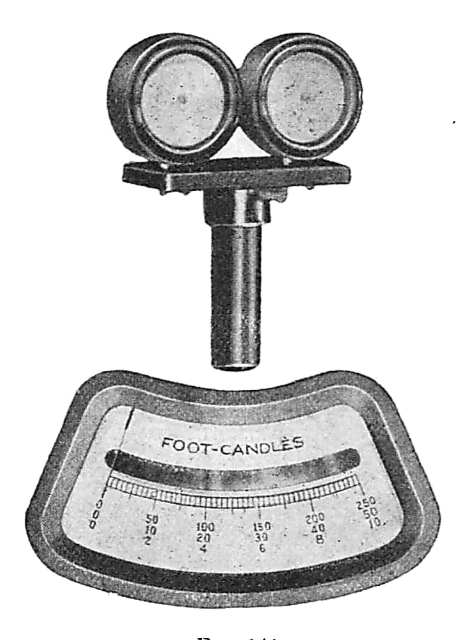


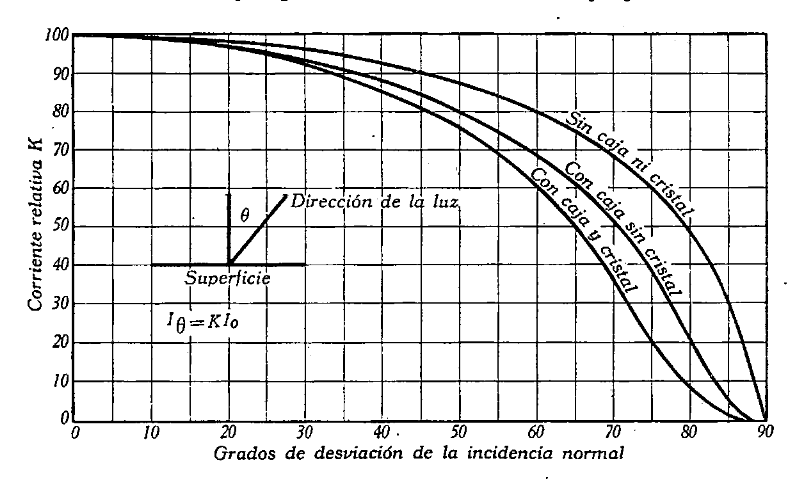
Fig. 141

La salida de una lámpara tarada nos da solamente la salida media de un gran número de lámparas de almacén; por consiguiente, es evidente que un proyector nuevo cualquiera y una lámpara nueva cualquiera de igual tipo no darán ese número de lúmenes en pantalla.

La tolerancia de fabricación en vatios puede alcanzar hasta ± 5 %, cuyo equivalente en lúmenes es del ± 12 %, y variaciones de voltaje en la proyección de un ± 5 % pueden añadir otro ± 18 % en lúmenes.

Fotómetros. Para poder efectuar todas las medidas a que antes hemos hecho referencia, se emplean unos aparatos llamados fotómetros; existe de ellos una variedad tan grande, con características especiales cada uno, que no es posible entrar a describirlos aquí; digamos únicamente que el más corrientemente empleado en esta clase de medidas, por las garantías de su construcción y por la adaptabilidad a las mismas, está constituído a base de una célula fotoeléctrica, y un galvanómetro muy sensible, convenientemente calibrado. La figura 141 nos muestra el más usual en América, construído por la firma Weston, con célula *Photronic*, de las propiedades de la cual nos ocuparemos a continuación y también al tratar más adelante de las *Células fotoeléctricas*. Como se ve en la figura 141, tiene tres alcances, los cuales se adaptan a la magnitud del foco de luz; para los usos corrientes de cine existe un modelo especial más barato, el modelo 703, que tiene una sola escala de cero a 30 bujías-pie y que lleva el filtro de que antes hemos hablado.

Efectos del ángulo de incidencia sobre la corriente. El efecto de la iluminación sobre la superficie sensible de la célula sería constante si las propiedades de absorción y reflexión de la misma fuesen constantes para todos los ángulos de incidencia. En realidad, estas propiedades varían algo en la célula Photronic, especialmente para valores de este ángulo próximos a 90°. Además, hay una reducción en la sensibilidad debido a la sombra que produce el borde de la caja y a la reflexión



I_o = Corriente con incidencia normal.
I_θ = Corriente con incidencia y Ángulo θ; ambas para la misma iluminación.
Filamento de tungsteno a 3000° K.

FIG. 142. Célula fotoeléctrica Weston photronic. Relación entre el ángulo de incidencia de la luz y la corriente

producida por la superficie del vidrio. Las curvas en la figura 142 muestran los efectos relativos de estos factores sobre la corriente producida por la célula.

Si, por ejemplo, se desea medir la iluminación en el centro de una fuente hemisférica de flujo luminoso, uniformemente distribuído, puede mostrarse por medio de la integración gráfica utilizando las curvas dadas, que la célula Photronic indica, aproximadamente, un 76 % del valor real. Si la fuente luminosa consiste en una zona de esfera incluída en un ángulo de incidencia de 50°, la célula indica en este caso un 90 % del valor real.

Este efecto del ángulo de incidencia no es tan importante como podría parecer a primera vista, por la razón de que todas las superficies presentan efectos semejantes cuando se iluminan con ángulos diversos. Por ejemplo: una página impresa no aparece igualmente brillante al ojo del observador cuando es iluminada por la luz que la alcanza con ángulos distintos al perpendicular, y la reducción en el brillo y, por tanto, en la facilidad de la lectura, para muchas clases de superficies, corresponde muy aproximadamente a la indicación de

la célula. Puede expresarse esto diciendo que la célula da, en la mayoría de los casos prácticos, una indicación de la efectividad visual de la iluminación.

Sensibilidad espectral o de color. La sensibilidad relativa de la célula Photronic para un circuito de resistencia relativamente baja se muestra en la figura 29. La curva representa las corrientes medias relativas producidas por flujos radiantes de diversas longitudes de onda. La curva llena muestra la sensibilidad de la célula sin una ventana de vidrio o con una ventana de cuarzo, de manera que se obtenga sensibilidad a las radiaciones ultravioleta en adición a las visibles e infrarrojas. La curva de puntos muestra el efecto de una ventana de cristal que absorbe la mayor parte de las radiaciones ultravioleta.

Para fines de comparación, está representada también la curva de sensibilidad normal del ojo. Nótese que la curva de la célula ofrece el máximo en el color amarillo correspondiente a una longitud de onda de 580 mμ, mientras que el ojo ofrece la sensibilidad máxima en el amarillo-verde correspondiente a 555 mμ. La célula es más sensible que el ojo en las regiones del azul y del rojo, y su sensibilidad se extiende bastante en las regiones del ultravioleta y del infrarrojo.

Las longitudes de onda en las curvas se dan en milimicrones (0,000001 mm). La unidad Angstrom (0,0000001 mm), que es una décima parte de la anterior, se usa muy a menudo para las medidas de longitudes de onda. Por ejemplo: 400 mμ son igual a 4000 Å.

Las células que deben usarse en la región del ultravioleta suelen suministrarse con ventana de cuarzo, si así se desea.

Sensibilidad espectral absoluta. La sensibilidad espectral absoluta de las células no es la misma para todas ellas, pues varía un poco a causa de las oscilaciones inevitables durante su fabricación.

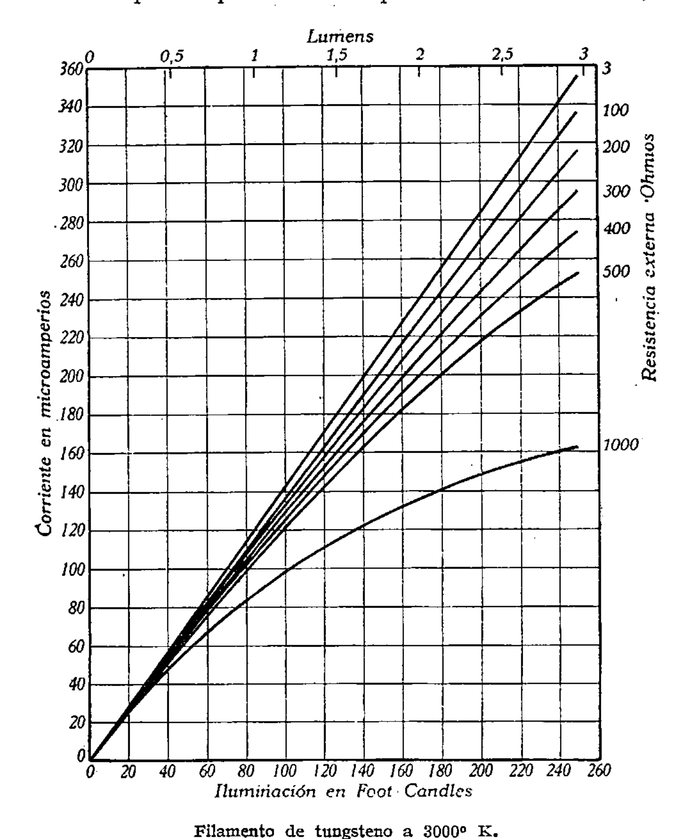
La célula normal en la región de máxima sensibilidad, 580 mμ, produce una corriente en un circuito de resistencia baja de 0,046 μA por micro-vatio de flujo radiante a esta longitud de onda. Por tanto, 100, en la curva de sensibilidad espectral relativa, representa 0,046 μA por micro-vatio y los demás puntos en la curva tienen valores proporcionales.

El valor máximo 100, en la curva de visibilidad, corresponde en valor absoluto a 621 lúmenes por vatio a esa longitud de onda, de lo cual pueden derivarse todos los valores correspondientes a otras longitudes de onda.

Efecto de la resistencia del circuito sobre la sensibilidad espectral. La curva (fig. 29) representa la distribución espectral de la corriente total generada en la célula para cualquier longitud de onda. Esta misma distribución de corriente se observa en el circuito exterior del galvanómetro a condición de que su resistencia sea relativamente baja. No obstante, si la resistencia exterior es relativamente grande, la distribución exterior de la corriente no sigue esta curva, pues las corrientes se modifican por la acción sobre ellas de la resistencia y

del flujo radiante de un modo semejante al que puede observarse en la figura 143.

Filtros de compensación para la sensibilidad del ojo. Cuando se usa la célula Photronic para medidas de iluminación, sus indicaciones deben considerarse de absoluta precisión únicamente para luz del mismo carácter que la que se utilizó para calibrar la célula, a menos



Filamento de tungsteno a 3000° K.

FIG. 143. Célula fotoeléctrica Weston photronic. Relación entre la resistencia externa y la corriente

que no se utilice un filtro adecuado. Esto es debido a las diferencias de sensibilidad espectral que hacen que las iluminaciones medidas afecten al ojo y a la célula distintamente. Suponiendo que la célula haya sido calibrada para filamentos de tungsteno a una temperatura de color de 3000° K, no es preciso corrección alguna para medidas de iluminaciones que tengan la misma composición espectral que la luz solar. Esto es el resultado de una relación accidental entre las sensibilidades del ojo y de la célula y de las distribuciones espectrales relativas del flujo radiante de las dos fuentes consideradas.

Ha sido desarrollado un filtro, el Viscor, que transforma la sensibilidad espectral de la célula para hacerla aproximadamente igual a la del ojo. Cuando se usa un filtro de esta clase, la célula puede ajustarse para cualquier fuente luminosa y usarse para medir la iluminación de otras fuentes distintas de cualquier color, ya sea monocromático ya heterocromático, con un grado de precisión relativamente alto.

Los defectos de la proyección

Después del estudio particular que hemos hecho de los distintos elementos que constituyen el sistema de proyección, nos incumbe ahora dar a conocer cuáles son los defectos que pueden presentarse en la misma, determinando su origen y tratando de dar los modos de remediarlo en lo que sea posible, así como los complementos indispensables a los medios de ajuste que ya hemos indicado al estudiar cada elemento.

Estos defectos tienen su origen en cada uno o en varios de los componentes de aquel sistema, y basta que uno de ellos no responda a las cualidades de los demás para que la proyección sea defectuosa o de un nivel inferior al esperado; así, un foco defectuoso, inestable o insuficiente, una mala obturación, un objetivo con aberraciones o con abertura insuficiente, un crono, en fin, con excesivo juego en el mecanismo intermitente de progresión de la película, o una pantalla sucia o inadecuada a las características especiales del local en cuanto a sus cualidades difusoras, pueden ser otras tantas causas que reduzcan grandemente el nivel que cabría esperar si todos esos elementos fueran convenientemente seleccionados y perfectamente ajustados, para contribuir a las mejores condiciones de trabajo. Los criterios que demos aquí no tienen un carácter absoluto y sirven de complementos, como ya hemos dicho, a las condiciones de ajuste dadas al estudiar cada uno de los componentes del sistema de proyección, y a las especiales que cada fabricante suele dar para obtener el mejor rendimiento de sus productos.

Para su mejor comprensión agruparemos estos defectos en la siguiente forma:

a) Defectos del arco y sistema colector de luz.
b) Defectos de obturación.
c) Defectos del sistema de progresión de la película.
d) Defectos del objetivo de proyección.
e) Defectos de la pantalla.

a) **Defectos del arco y sistema colector de luz.** Ya hemos indicado al tratar de los distintos tipos de arcos, cuáles son las condiciones óptimas bajo las que cada uno debe operar, especialmente en lo que se refiere a diámetro y tipo de carbones, consumo de corriente y tensión de trabajo, así como la distancia entre carbones.

Las características de los carbones usados en muchos de los arcos de alta intensidad son tales, que es absolutamente importante que se quemen a una corriente predeterminada; en algunos casos, el régimen de consumo de carbones puede ser afectado actuando sobre la corriente, pero ello perturba desfavorablemente la estabilidad del cráter del arco o su contenido en color, y ambos extremos deben evitarse; en consecuencia, un cambio en el valor de la corriente con tal finalidad es una falsa economía.

En cuanto al colector de luz, según sabemos, los dos factores que deciden la eficiencia del mismo son la distancia colector-apertura —ya de espejo o de lentes condensadoras— y la colocación del cráter positivo o foco de luz propiamente dicho, en el punto focal de servicio del sistema colector. Naturalmente, es indispensable mantener la separación entre carbones a la distancia especificada en cada caso, mientras se hace el ajuste de aquellos dos factores, pues de otro modo, pérdidas de luz en la pantalla imputables únicamente al arco, se podrían atribuir al colector de luz.

Todos los constructores de linternas indican la distancia que debe existir entre el vértice del espejo y la apertura; tal distancia debe ser escrupulosamente mantenida, pues de ella depende fuertemente la calidad de la iluminación en la pantalla. Refiriéndose al caso concreto de reflector de espejo, esa distancia viene condicionada, de una parte, por el aumento de la imagen, que, según sabemos, toma aproximadamente el valor 6 : 1 y, en algunos casos, 4,5 : 1, y, de otra parte, por la exigencia de que dicha imagen se forme precisamente en el plano de la apertura.

Cuando la distancia espejo-apertura aumenta más allá del valor especificado aumenta también el diámetro de la imagen del cráter sobre la apertura con la consiguiente pérdida de luz sobre la pantalla; si, por el contrario, el espejo se acerca a la apertura, aquel diámetro decrece sobre su tamaño normal, apareciendo descoloridos los ángulos y márgenes de la pantalla.

Veamos lo que sucede cuando la posición del foco no es correcta: Éste, según sabemos, está representado por el cráter positivo, y como la imagen dada sobre la apertura debe estar ampliada en la relación 6 : 1 o bien 4,5 : 1 según los casos, dicho cráter se encontrará muy cerca del foco geométrico del espejo, y en una posición tal —que llamaremos *foco de servicio*— que a la distancia correcta a que se encuentra la apertura se forma allí la imagen con ese aumento, de tal modo que cubra por completo la apertura, pero sin sobrepasarla excesivamente; generalmente basta que la mancha circular del cráter sobre la apertura tenga un diámetro de unos 4 mm en exceso sobre una diagonal de la apertura.

Si la sobrepasara en exceso, la densidad de luz o brillo intrínseco de esta imagen disminuiría, y también la intensidad de iluminación sobre la pantalla; si, por el contrario, esa imagen no cubriese toda la ventanilla, los ángulos y lados de la pantalla aparecerían oscuros,

como antes (figs. 144 y 145). Existe, pues, *para un colector y un tamaño dado de cráter, una posición precisa del foco de servicio muy próxima al foco geométrico del espejo, y una distancia también precisa colector-apertura, para los que la iluminación de la misma y, por tanto, de la pantalla, es correcta.*

Si el cráter del arco se encuentra ligeramente más cerca del espejo que esa posición, el cono de luz que cae sobre la apertura aumenta

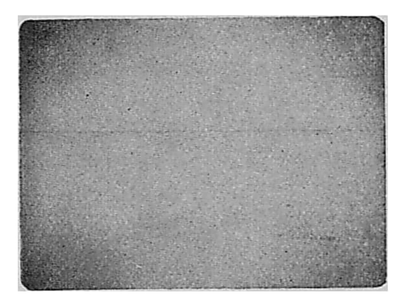


FIG. 144

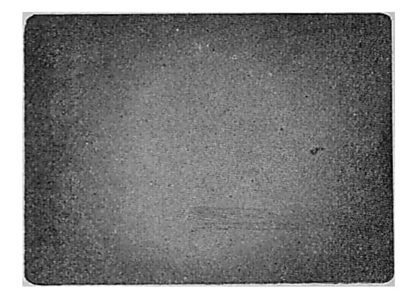


FIG. 145

de abertura, y, además, la luz sobre la pantalla adquiere un tinte amarillo; si, por el contrario, se aleja el cráter de esa posición en sentido contrario, el cono disminuye de abertura, y la luz da un tinte azulado en la pantalla, y el aspecto de la figura 144. Finalmente, si la posición del cráter se encuentra más alejada del espejo que su centro de cur-

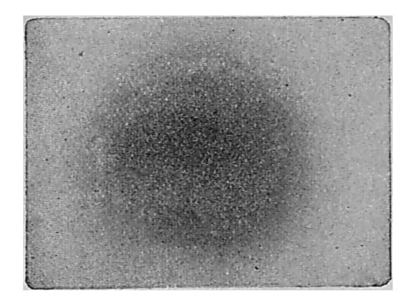


FIG. 146

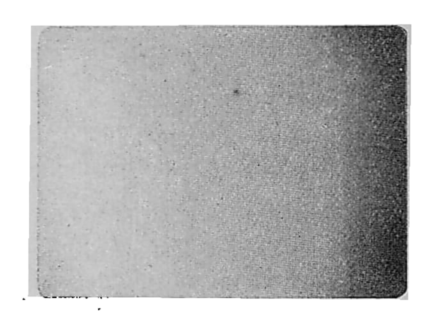


FIG. 147

vatura, se produce una mancha oscura en el centro de la apertura, que es la sombra del carbón positivo y portacarbones sobre la misma, y la pantalla toma el aspecto de la figura 146. Puede suceder también que el espejo y el arco no estén perfectamente alineados en el eje de simetría o principal de todo el sistema de proyección, lo que produce efectos de luz en la pantalla como el de la figura 147; la corrección se hará moviendo el elemento desviado en sentido contrario al

lado en el que se produce la sombra, en virtud de la inversión de imágenes. Todos estos cambios de iluminación se perciben también en la apertura, y cualquier defecto de uniformidad o iluminación de ésta se traduce fuertemente en la pantalla.

b) **Defectos de obturación (Travel-Ghost).** Este defecto se produce cuando el obturador cierra la salida de luz después de haber empezado a moverse la película para pasar de un cuadro al siguiente (obturador retrasado); o bien abre la salida de luz cuando todavía la película se encuentra en movimiento, por no haber alcanzado aún la posición de reposo el cuadro siguiente (obturador adelantado); sus efectos son especialmente perceptibles en los letreros y zonas de grandes contrastes en la película, y consisten en una prolongación hacia arriba o hacia abajo (fig. 148) de los fondos blancos sobre los negros en forma de cola estriada o rayada cuya longitud depende del grado de desobturación; este fenómeno se llama *deslizamiento de la imagen.*



Fig. 148

Si se tiene en cuenta lo que dijimos al hablar de la persistencia de las imágenes en la retina (¹) es muy fácil darse cuenta del origen del fenómeno. Imaginemos que la película se pone en movimiento antes de que el obturador haya cerrado la ventanilla de proyección; como la película se mueve hacia abajo y la imagen está invertida, ésta se moverá en la pantalla hacia arriba una pequeñísima cantidad o longitud antes de que el obturador haya cerrado el paso de la luz, y cuando nuevamente vuelva a salir luz sobre la pantalla a través del cuadro siguiente, veremos superpuesta a la imagen de este cuadro la del anterior ligeramente desplazada *hacia arriba* y menos intensa, puesto que la imagen formada de ella en la retina, por ser más antigua, tiende a desaparecer. En realidad, esto que acabamos de explicar con dos cuadros consecutivos sucederá con más de dos, lo que depende de la relación entre el tiempo que permanece la imagen en la retina y el tiempo de permanencia de cada cuadro delante de la apertura ($^1/_{32}$ de segundo en el caso corriente), y entonces se comprende la naturaleza estriada horizontalmente que presentan los deslizamientos de imagen.

(¹) Este fenómeno o algo semejante tiene lugar en fotografía de objetos en movimiento muy rápido. Véase Gil Santiago, *Curso de cine sonoro (II Registro)*, en preparación.

En definitiva, cuando el deslizamiento de imagen aparezca por la parte superior de las figuras *debe adelantarse el obturador*, con respecto al movimiento del rodillo de arrastre de la película.

Imaginemos ahora que sucede lo contrario, es decir, el obturador abre la ventanilla de luz cuando todavía está moviéndose la película para pasar de un cuadro que ya ha sido proyectado al siguiente; entonces el ojo recibe, superpuestas a la imagen del cuadro que se proyecta, las imágenes sucesivas de las distintas posiciones próximas del cuadro en movimiento, desplazados estos cuadros hacia arriba y, por tanto, sus imágenes hacia abajo; es decir, el deslizamiento de la imagen aparece ahora por debajo de la imagen que se proyecta, y podremos decir: *cuando el deslizamiento de imagen aparezca por debajo, hay que retrasar el obturador*, con respecto al rodillo de arrastre de la película. Ambas cosas pueden hacerse fácilmente aflojando el obturador sobre su eje para poder girarlo ligeramente en el sentido conveniente, o manteniendo éste fijo y girando ligeramente el rodillo de arrastre sobre su eje también según convenga.

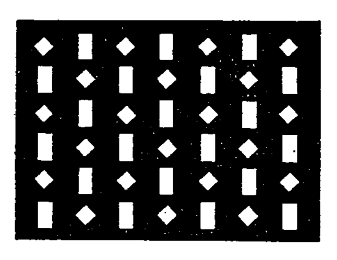


FIG. 149

Cuando el arrastre de la película se efectúa, como sucede en la mayor parte de los proyectores de 16 mm, por el sistema de leva, o cuando tiene lugar un desgaste en los cojinetes del eje de la cruz de Malta o en aquel mismo mecanismo, se presenta igual fenómeno de un modo intermitente en el primer sistema, lo que suele ser indicio de que el resorte de la leva del obturador no tiene suficiente tensión, o bien de un excesivo desgaste en los engranajes y cojinetes; en los tipos corrientes de mecanismos de cruz de Malta, el fenómeno va poniéndose de manifiesto a medida que aumenta el desgaste; primeramente se observa una especie de halo en la pantalla que sólo es perceptible en las primeras filas de butacas de la sala, y que a medida que aumenta aquél se va haciendo observable cada vez más atrás, hasta extenderse a toda la sala y produciendo una sensación de fatiga en el espectador. Para evitar ese defecto o reducirlo en lo posible se emplea actualmente en América un sistema de arrastre de la película con dos cojinetes en lugar de uno (figura 112), y un collar de ajuste que elimina todo juego axil del rodillo y, con él, el correlativo de la película *(sidesway)*. A veces, todos estos tipos de proyección defectuosa no son observables desde la cabina, y se requiere que un observador cercano a la pantalla avise al operador si la correción es completa y si es «hacia arriba» o «hacia abajo», para saber en qué sentido debe corregir la obturación.

La «Society of Motion Picture Engineers» ha lanzado un tipo de película de pruebas para imagen y sonido, que contiene una serie de imágenes que permiten detectar fácilmente cada clase de defectos.

Estas películas, que las hay idénticas en ancho normal de 35 mm y substandard de 16 mm, tienen una longitud de unos 150 m y una duración de 5 minutos aproximadamente de proyección.

La figura 149 muestra la imagen empleada en tales películas para determinar y corregir los deslizamientos de imagen en ambos sentidos.

c) **Defectos del sistema de progresión de la película.** Acabamos de decir que el desgaste y juego excesivo en los cojinetes y elementos que forman el mecanismo de la cruz de Malta origina deslizamientos de imagen intermitentes. Además de este tipo de deformación, existen otros dos de tipo más permanente: el *salto vertical de la imagen (Picture jump)* y el *salto horizontal de imagen (Picture weave)*.

El primero consiste en un movimiento vertical de oscilación muy pequeña que experimentan las imágenes haciendo éstas temblonas, lo que produce una sensación muy desagradable y fatigosa; la imagen empleada para ponerla de manifiesto y determinar el valor de su amplitud se da en la película de prueba a que antes hemos aludido en la forma de la figura 150.

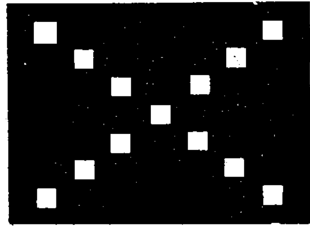


Fig. 150

Las principales causas que pueden motivar el primer defecto son:

1. Tensión insuficiente o excesiva de los presores de ventanilla o patines.

2. Rodillo intermitente de arrastre de película de dimensiones incorrectas (este defecto puede producirlo también una copia excesivamente contraída aunque el rodillo sea correcto).

3. Suciedad o gelatina acumulada en la superficie del rodillo intermitente.

4. Vibraciones transmitidas desde el motor del proyector.

5. Ajuste incorrecto del mecanismo de progresión.

6. Eje del obturador encorvado o disco de obturación desequilibrado y sometido a esfuerzos originados por la fuerza centrífuga.

7. Desgaste de los dientes del rodillo intermitente.

8. Apoyo inseguro y poco firme del proyector.

9. Flojedad del objetivo en su portaobjetivo, o de las lentes componentes del mismo dentro de su armadura.

10. Posición incorrecta del rodillo intermitente en su eje (excentricidad).

11. Taladros de perforación de la película en prueba, desgastados o desgarrados.

Para la medida del salto vertical, se proyecta la película de prueba (fig. 150), y se coloca una regla sobre la pantalla, graduada en milímetros, midiendo entonces el desplazamiento de uno de los cuadros en dirección vertical. Cuando el proyector es de primera calidad y el me-

canismo intermitente y los patines de la ventanilla de proyección están correctamente ajustados, el desplazamiento vertical no debe exceder de los valores que se indican a continuación (un tercio del 1 % de la altura de la imagen en la pantalla) para películas de 35 mm:

Movimiento vertical	*Altura de la pantalla*
1/8″ (3,17 mm)	3′ (91,5 cm)
1/4″ (6,35 »)	6′ (183,0 »)
3/8″ (9,52 »)	9′ (274,5 »)
1/2″ (12,70 »)	12′ (366,0 »)
5/8″ (15,87 »)	15′ (457,5 »)
3/4″ (19,05 »)	18′ (549,0 »)
7/8″ (22,22 »)	21′ (640,5 »)

En cuanto a películas de 16 mm, tanto este defecto como el de obturación incorrecta, presentan un valor prácticamente despreciable y el salto vertical puede tomar, en proyectores de mediana calidad, hasta el valor de 6,35 mm (1/4″) sobre una pantalla de 1,83 m (6′) de altura, y en proyectores de primera calidad no debe exceder de 3,17 mm (1/8″) para la misma altura de la imagen en la pantalla.

El segundo defecto de los antes citados *(Picture weave)* consiste en un temblor u oscilación de la imagen en sentido horizontal, que puede originarse por las siguientes causas:

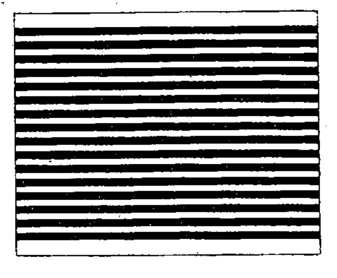
1. Tensión insuficiente de rodillos guías.
2. Desajustes, rayados o defectos en los rodillos guías.
3. Ajuste incorrecto del rodillo de arrastre intermitente.
4. Mala colocación de este rodillo en su eje (oblicuidad).
5. Taladros de perforación de la película en prueba, desgastados o desgarrados.

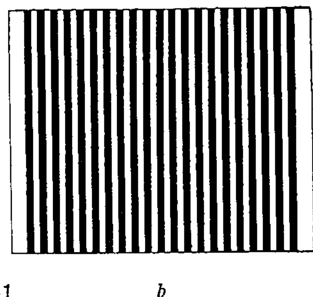
La comprobación se efectúa con la misma imagen de la película de prueba (fig. 150) y colocando como antes una regla graduada sobre la pantalla, pero midiendo ahora los desplazamientos de los cuadros en sentido horizontal. Como antes también, en proyectores de primera calidad esta oscilación no debe exceder de un tercio del 1 % del ancho de la imagen sobre la pantalla. El mismo cuadro anterior puede servir para determinar su valor numérico relativo, a condición de tomar todas las magnitudes como horizontales en lugar de las verticales, y que las alturas de imagen sean ahora anchuras. Para proyectores de 16 mm se aplica también el mismo criterio.

d) **Defectos del objetivo de proyección.** Al hacer el estudio de las lentes en general y después los objetivos, hemos visto cuáles eran los defectos o aberraciones que tales objetivos podían tener, y hasta hemos indicado someramente algún medio de comprobar algunos de ellos; no obstante, la S. M. P. E. tiene también en su película de pruebas algunas imágenes destinadas a poner de manifiesto los más corrientes en este tipo de objetivos, si bien aquí no cabe, como en los casos anteriores, otra medida que la sustitución del objetivo defectuoso

por otro que no tenga los defectos de aquél, y en el caso de ser poco luminoso o rápido, por otro de mayor abertura relativa dentro de la distancia focal necesaria para la sala en cuestión.

Para la comprobación de las aberraciones esféricas, la película de pruebas tiene una serie de imágenes o cuadros con líneas horizontales paralelas y muy finas, y otra serie de cuadros con líneas análogas, pero verticales; basta que alguna región de las imágenes correspondien-





a Fig. 151 *b*

tes (fig. 151 *a* y *b*) aparezcan con coloraciones en los bordes de las líneas o que éstas aparezcan borrosas para poder desechar el objetivo por no estar suficientemente corregido. Sin embargo, los fabricantes acreditados de objetivos no se conforman con esta prueba, ya que alegan, y con razón, que un objeto móvil como es la película, puede ejercer influencia incluso en sentido favorable sobre el grado de corrección de las aberraciones de un objetivo, ni tampoco puede servir una placa de acero con pequeños taladros en su superficie colocada en la apertura, como se ha hecho a veces para demostrar la calidad de un objetivo, ya que dicha placa tiene espesor suficiente para que los taladros no sean enfocados perfectamente sobre una sección recta y sí sobre una oblicua dando elipses; lo que, por otra parte, pueden originar las dilataciones producidas por el calor concentrado por el foco en la apertura. Así, la firma Kollmorgen emplea en su lugar una delgada lámina de cuarzo perfectamente transparente y homogéneo en una de cuyas superficies se ha depositado químicamente una delgadísima capa de plata y en ella, mediante una máquina de dividir, se ha trazado una cuadrícula de líneas muy finas que son así transparentes a la luz. Estas líneas están separadas entre sí 1,016 mm (0,04″) y tienen cada una una anchura transparente a la luz de 0,0254 mm (0,001″) (fig. 152). Esta lámina se coloca en la apertura del proyector: si el objetivo tiene aberración cromática, mostrará en la pantalla una serie de franjas

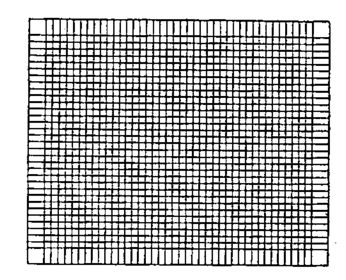


Fig. 152

rojas y verdes en las líneas claras o, lo que es peor, hará aparecer esas líneas opacas y sombrías, y en lugar de un aspecto blanco brillante dará a la imagen un aspecto laqueado; si tiene aberración esférica, será imposible obtener en el centro del campo una imagen vigorosa.

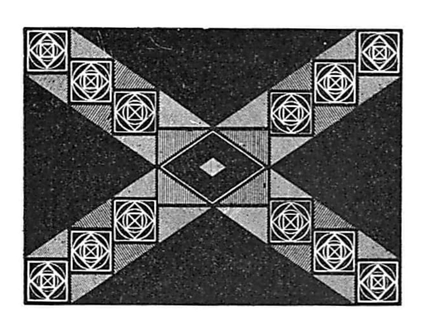


Fig. 153

La curvatura de la imagen y el astigmatismo mostrará los bordes del campo o pantalla borrosos y estriados, cuando en el centro sea muy aguda y perfecta la imagen. En algunos objetivos la corrección puede ser tal que se obtenga una buena imagen en el centro y en los bordes con un mismo enfoque; solamente un objetivo de primera calidad podrá mostrar las líneas blancas recortadas y a ángulo recto a través de todo el campo en la pantalla.

Para comprobar la profundidad de foco y su ajuste, en la película de pruebas se utiliza cuadros como el de la figura 153, y el objetivo será tanto mejor cuanto mayor sea el número de cuadros que a partir del centro de la pantalla se encuentran perfectamente claros y definidos.

Por último, para comprobar la uniformidad de la iluminación y el factor de homogeneidad de la pantalla, en la tantas veces citada película se utilizan cuadros como el de la figura 154, que permite apreciar visualmente el brillo relativo de los diferentes círculos según su posición en la pantalla.

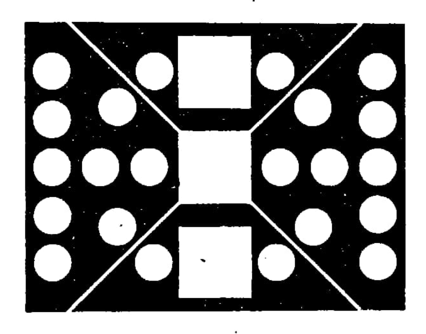


Fig. 154

e) **Defectos de la pantalla.** Cuando hemos hablado de los distintos tipos de pantallas hemos visto que no todas son igualmente aptas para cualquier tipo de local. Como hicimos notar allí, la suciedad y la pérdida consiguiente de su poder reflector son las dos causas fundamentales de que la proyección vaya paulatinamente desmereciendo, y contra esto, aparte de su limpieza frecuente cuando sea fácil y posible, el único remedio es su frecuente sustitución.

Debe procurarse que la pantalla se encuentre lo más atrás posible dentro del escenario, porque ello permite a los espectadores de las primeras filas ver las imágenes bajo menor ángulo, con la ventaja consiguiente de una mejor perspectiva, aunque esto tiene un tope impuesto por las dimensiones del escenario y por la colocación de los elementos de sonido situados detrás de ella. Como ya hemos indicado,

la figura 154 representa los cuadros de la película de prueba dedicados a la finalidad de comprobar el estado y depreciación de la pantalla, y para un estudio más a fondo de la misma se tendrá en cuenta todo lo dicho al tratar de la iluminación de la pantalla, y en especial sus medidas con el fotómetro fotoeléctrico (1).

(1) Una buena práctica es que la distancia de la primera fila de asientos a la pantalla no sea inferior a la anchura de ésta.

X. Nociones de acústica y reproducción de la música y la conversación (1)

Sonido, producción y propagación

Los cuerpos elásticos se caracterizan por la propiedad de que sus elementos materiales —llamémosles moléculas— poseen una posición de equilibrio, y si, por una fuerza o agente exterior, se desvían de la misma, tienden a volver a ella por la acción de una fuerza llamada elástica, la cual obra sobre el punto o elemento y está dirigida hacia la posición de equilibrio, siendo su valor (dentro de límites fijos, pasados los cuales el cuerpo deja de ser elástico) proporcional al desplazamiento que experimenta el elemento material desde su posición de equilibrio (ley de Hooke). Esta fuerza combinada con la de inercia que como grave posee ese elemento, da origen a una oscilación del elemento alrededor de su posición de equilibrio, que en primera aproximación se puede suponer sinusoidal (2). Este movimiento oscilatorio estará, pues, caracterizado cuando se conozca la *amplitud* del mismo, su *frecuencia o período* y la *fase* en un momento determinado.

Como quiera que el aire es también un medio elástico, recibe en sus moléculas los impulsos de los elementos de cualquier cuerpo elástico en vibración y a su vez toman este estado de movimiento, propagándose de unas moléculas a otras a través del espacio, en forma de un aumento o enrarecimiento de la presión, y cuyo resultado es la formación de frentes de ondas progresivas.

---

(1) La gran mayoría de los datos que se refieren al estudio de las bandas de música y conversación que aparecen en este capítulo, se deben a la cortesía de la Jensen Radio Mfg. C°.

(2) En realidad interviene, además, una fuerza disipativa de rozamiento que tiende a amortiguar este movimiento, cual sucede, por ejemplo, con un péndulo. El caso sencillo de movimiento sinusoidal puro, que siempre comenzamos por estudiar, se debe a una célebre proposición del francés Fourier según la cual todo movimiento periódico puede descomponerse en una suma finita o infinita de movimientos sinusoidales de amplitudes a_1 a_2 a_3 ... y frecuencias ν, 2ν, 3ν, 4ν ... La frecuencia ν se llama fundamental, mientras que 2ν, 3ν ... son las frecuencias de los armónicos 1.°, 2.°, 3.°. Esto es válido lo mismo en Óptica que en Acústica, en Electricidad que en Mecánica, y justifica que siempre se inicie el estudio de uno sólo de los componentes.

Cuando el período de vibración está comprendido entre 20 y 20 000 ciclos por segundo, estas *ondas* se llaman *sonoras,* y el cuerpo material que las origina, *foco sonoro,* porque son capaces de impresionar nuestro sentido del oído, y de igual modo que en óptica hay, además del espectro visible, las luces infrarroja y ultravioleta, así también hay los *infrasonidos* cuando su frecuencia es inferior a los 20 ciclos/s, y los *ultrasonidos* (hoy en pleno desarrollo en cuanto a sus aplicaciones) cuando la frecuencia excede de los 20 000 ciclos/s, pero que no impresionan nuestro sentido auditivo. En resumen: *Todo cuerpo elástico capaz de entrar en vibración puede engendrar sonido, y sólo puede ser percibido por nosotros si hay otro medio elástico* (aire, agua, etc.) *entre el foco sonoro y nuestro oído.* Es ésta una diferencia esencial entre las ondas sonoras, que necesitan un medio material para propagarse, y las radiaciones electromagnéticas de que hemos hablado en óptica, que no requieren ningún soporte material.

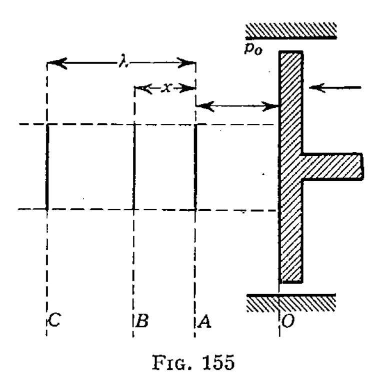


FIG. 155

Propagación de ondas sonoras. Para formarnos una idea de la propagación del sonido en forma de ondas, vamos a considerar un pistón (fig. 155) de dimensiones bastante grandes para que se pueda estudiar lo que sucede en un cilindro del espacio normal a él y en su centro, de tal modo, que, prácticamente, aquel pistón es ilimitado con respecto a este cilindro espacial. Supongamos que ese pistón se mueve con movimiento sinusoidal en el sentido marcado por la flecha, a uno y otro lado de su posición de equilibrio, y vamos a ver qué sucede a las moléculas de aire situadas en un plano normal al plano del dibujo situadas en una sección recta de aquel cilindro ideal que pasa por A; suponiendo, además, que la presión atmosférica antes del movimiento vale p_o para todos los puntos del espacio. A medida que el pistón avanza hacia la izquierda, se produce en la capa de aire en inmediato contacto con él un aumento progresivo de presión, hasta que alcanza su posición extrema, en cuyo caso la presión en el plano que pasa por A vale $p_o + p$. Cuando el pistón, prosiguiendo su movimiento, inicia el retroceso, comienza a decrecer la presión en A, para volver a tomar el valor p_o en O y continúa decreciendo hasta que aquél llega a la posición extrema izquierda, en cuyo caso la presión en A ha pasado a tomar el valor $p_o - p$; en su movimiento de retorno a su posición inicial, la presión en A vuelve a aumentar hasta adquirir nuevamente el valor p_o; el tiempo empleado por la presión en A en recorrer el ciclo completo de su variación es precisamente T, el empleado por el pistón en su ciclo de recorrido, y como esta variación de presión se hace al mismo ritmo sinusoidal del movimiento del pistón, podremos repre-

sentar su valor en un instante dado t, por la expresión

$$P_A = p_o + p \cos \frac{2\pi}{T} t.$$

Estas variaciones de presión se transmiten en virtud de la elasticidad del aire a las capas sucesivas del mismo con un cierto retraso, debido a que la propagación no es instantánea; esto quiere decir que se propagan con una velocidad finita c, de tal modo, que si para llegar de la capa A a la B distante x de A emplea un tiempo t_2, el valor instantáneo que tomará la presión en B, en el mismo momento t, será

$$P_B = p_o + p \cos \frac{2\pi}{T} (t - t_2).$$

Veamos ahora cómo se transforma esta última expresión. Evidentemente, en el tiempo T igual al período, la variación de presión alcanzará a un plano C distante del A una distancia λ, a la que se llama *longitud de onda,* porque los puntos de ese plano tienen la misma fase que los de A, y como la propagación se hace con movimiento uniforme, y en este tipo de movimiento los espacios son proporcionales a los tiempos, el tiempo t_2 empleado en recorrer la distancia x valdrá $t_2 = \frac{T}{\lambda} x$. Si en la expresión de la presión P_B reemplazamos este valor de t_2, se obtiene

$$P_B = p_o + p \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T}{\lambda} x\right) = p_o + p \cos \omega \left(t - \frac{x}{c}\right); \; \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Vemos, pues, que volvemos a obtener para la propagación de las variaciones de presión que originan el sonido una expresión idéntica, en cuanto a su forma, a la obtenida anteriormente para la propagación de la luz, con la única diferencia de la distinta significación de la amplitud, y los diversos valores relativos de λ y c, con respecto al casode la luz.

En definitiva: la variación de presión se propaga por ondas—planas, en este caso particular estudiado—con velocidad c y longitud de onda λ, entre las cuales y el período existe, como siempre, la relación $cT = \lambda$ ó $c = \lambda f$. La presión p se mide en dinas por centímetro cuadrado (¹) (barias), y la presión atmosférica p_o vale 1,013,000 dinas por centímetro cuadrado (14,7 libras por pulgada²), y aquellos valores de p oscilan para 1000 c/s, entre valores tan pequeños como 0,000204 dinas por centímetro cuadrado que constituyen el límite de audición de un oído normal, y un máximo de 200 para los sonidos más fuertes; se ve, pues, que estas presiones sonoras varían de 10^6 a 1 (120 dB) y que aún, en el último caso extremo, forman una fracción pequeña del

(¹) Una dina por cm^2 se llama *baria.* Como el aire presente una impedancia mecánica sensiblemente constante, las presiones pueden representar energías y éstas se podrán medir en barias, o en watios por cm^2 existiendo la *relación fácil* de deducir:

$$\text{Una baria} = 20\,000 \sqrt{\text{watios por cm}^2}$$

valor de p_0, lo que permite formarse una idea de la extrema sensibilidad de nuestro órgano auditivo.

Propiedades diferenciales. Las ondas sonoras experimentan los mismos fenómenos que hemos estudiado para las ópticas, sin más diferencia que la influencia que pueden tener en los mismos los valores relativos de λ y c; tales son la reflexión, refracción, dispersión, difracción, etc., y en relación con ello vamos a indicar explícitamente las más importantes:

a) Las ondas sonoras son *longitudinales*, y también transversales como las electromagnéticas; para las primeras no es válida la imagen que dimos de una piedra cayendo sobre la superficie libre de un estanque, ya que ahora la velocidad de las partículas en vibración del medio (aire, agua, etc.), o la compresión que experimenta un volumen pequeño del medio por la acción de dicho agente sonoro, tiene el mismo sentido radial que aquel en el que se propaga la onda; es decir, las moléculas se desplazan en el sentido de propagación de la onda o en el opuesto, pero no en sentido normal como sucedía allí.

b) La velocidad de propagación es mucho menor que antes, pues aquí sólo vale unos 330 m segundo (1080 pies segundo), aun cuando este valor varía ligeramente con la temperatura, y con la naturaleza del medio (en el agua vale 4,700 pies, en el acero 16,500, etc.). Las longitudes de onda varían, pues, entre 165 m y 16,5 cm notablemente superiores a las ópticas.

c) En el fenómeno de difracción (véase Difracción y poder separador) entra en juego las dimensiones relativas de la abertura por donde penetra la onda sonora, con respecto a la longitud de onda de la misma; dado que para la luz esa λ es extraordinariamente pequeña, se comprende que hagan falta aberturas extraordinariamente pequeñas también para que el fenómeno se realice, por lo que éste es poco frecuente. En el sonido en que las aberturas tienen dimensiones comparables con la longitud de onda más corrriente, el fenómeno es mucho más factible, estando tan acostumbrados a él que es muy frecuente tomar como cosa natural la percepción de sonido a través de obstáculos que imposibilitan la propagación en línea recta aun a grandes distancias de sus bordes, lo que sólo puede ser atribuído a dicho fenómeno de difracción. Precisamente, si como sucede cuando se quiere localizar objetos mediante reflexión del sonido en los mismos, se emplean ultrasonidos (pequeñas longitudes de onda) tal fenómeno queda muy atenuado y la propagación es sensiblemente rectilínea.

d) Hemos dicho antes que todos los elementos materiales situados en un frente de onda están en igual fase, y es corriente oír hablar de que el oído humano es incapaz de percibir diferencias de fase, pero a este respecto conviene distinguir tres casos distintos:

1.° Si los sonidos tienen frecuencias diferentes, entonces es exacto que el oído no distingue el defasaje entre los mismos.

2.° Si el sonido resulta de la adición de dos que tienen rigurosamente la misma frecuencia, por ejemplo dos ondas procedentes de

dos altavoces con el mismo amplificador que los alimenta, pueden existir puntos del espacio en los que se produzca un reforzamiento del sonido, originado por una perfecta concordancia de fase, mientras que en otros puntos en los que se hallen en oposición de fase, hay anulación de sonido; se trata de un fenómeno de interferencias análogo al que se produce en el caso de la luz, y su interés es muy grande en locales cerrados, como veremos después. Esto no depende para nada de las cualidades especiales de sensibilidad de nuestro oído.

3.° Por último: por medios artificiales se puede hacer percibir a cada uno de los oídos del observador, el mismo sonido en el mismo instante con dos fases distintas; por ejemplo: uniendo dos receptores a dos micrófonos situados éstos en el mismo auditorio; si la distancia entre los micrófonos es suficientemente grande, los sonidos que recogen tienen fases suficientemente diferentes para que el observador adquiera la *sensación de relieve sonoro*, recibiendo la impresión de verdaderos *planos sonoros* (véase *Efecto biaurial)*

Energía e intensidad de una onda sonora. Siendo, en fin de cuentas, una onda sonora una propagación de un estado de movimiento a través del espacio, habrá un flujo de energía transportada por ese movimiento, y podrá medirse expresando el flujo por segundo que pasa a través de la unidad de superficie en un punto del espacio; ese valor se expresará, pues, en microvatios por centímetro cuadrado, y dadas dos ondas de energías J_1 y J_2, se podrán comparar hallando su cociente $\frac{J_2}{J_1}$, tomando una de ellas como unidad. Hay, sin embargo, dos razones que inducen a emplear otro tipo de medida para las energías de las ondas; en primer lugar, *la energía sonora radiada por un sistema reproductor de sonido* (tal es un equipo de cine u otro amplificador cualquiera conectado a un conveniente sistema de altavoces) *es directamente proporcional a la potencia eléctrica de salida de dicho sistema,* y ya veremos que, para tales sistemas, su energía se expresa en escalas y unidades logarítmicas, y, por tanto, en la misma escala y unidades, aquellas energías sonoras se podrían expresar, desde un punto de vista puramente físico, aunque no totalmente subjetivo, así:

$$L_{dB} = 10\ lg_{10}\ \frac{J_2}{J_1}$$

donde L representa el número de decibelios o nivel de energía [1] de la onda de intensidad J_2 con respecto al nivel de la onda de energía J_1. Si en lugar de la unidad Decibel tomamos como unidad el Neper, entonces:

$$L_{\text{nepers}} = \frac{1}{2}\ lg_e\ \frac{J_2}{J_1}, \text{ donde } e = 2{,}72,$$

[1] Como nivel cero de energías acústicas, se toma 10^{-16} watios/cm^2 que equivale según la nota de la página 206 a $2 \cdot 10^{-4}$ barias.

pudiendo pasarse fácilmente de nepers a decibelios sin más que multiplicar el número de nepers por 8,685. Siendo las energías sonoras proporcionales a los cuadrados de las presiones desarrolladas por las ondas, o a los de las velocidades u_1 y u_2 de las moléculas del medio, se podrá escribir

$$L_{dB} = 20 \, lg_{10} \frac{p_2}{p_1} = 20 \, lg_{10} \frac{u_2}{u_1} \quad .$$

La razón que aconseja el uso de unidades logarítmicas es originada por las sensaciones que el sonido produce en nuestro oído, puesto que la sensación de *sonoridad* [1] provocada por la energía de la onda, está ligada a ella por una relación de tipo logarítmico, según la ley de Fechner-Weber, y algo análogo sucede a la sensación de luminosidad y la energía de la onda óptica. Sin embargo, el estudio del oído humano muestra ciertas anormalidades, que hacen que esa ley logarítmica no sea totalmente válida y que los niveles fisiológicos o de sensación sonora puedan ser distintos de los niveles acústicos.

Características del oído humano

Hasta ahora hemos definido tres características físicas del sonido: amplitud o intensidad, frecuencia y contenido de armónicos, todas las cuales tienen un carácter esencialmente objetivo; a ellas corresponden sensiblemente tres características fisiológicas de nuestro oído, que se designan por sensación de *sonoridad*, *tono* y *cualidad o timbre*.

Para darnos cuenta de lo que estas sensaciones representan y que son realmente las que determinan la bondad de una reproducción sonora, vamos a estudiar en relación con ellas las características del oído.

Sonoridad. Es bien conocido que si para una frecuencia particular se disminuye la intensidad del sonido, paulatinamente, llega un momento en el que aquél no es percibido por el oído. Si se mide la variación eficaz de presión $\frac{p}{\sqrt{2}}$ desarrollada en el tímpano de nuestro oído por el sonido, para cada frecuencia entre 20 y 20 000 c/s y para ese mínimo, se obtiene una curva llamada *umbral o frontera de audición* (fig. 156). Igualmente si aumentamos paulatinamente la intensidad de cada frecuencia y medimos la presión eficaz para el valor máximo posible, en que la sensación de audición se convierte en una dolorosa, obtenemos otra *frontera o umbral de sensaciones dolorosas*. El área limitada por ambas curvas se llama *de audición*, y en la misma fi-

(1) En los idiomas inglés y alemán existen dos palabras distintas para definir la energía o intensidad de la onda y la sensación que ésta produce (loudness, Lautstärke), mientras que no sucede igual en castellano; por eso hemos adoptado provisionalmente la de *sonoridad* para esta última, a falta de otra más adecuada.

gura 156 se ve que la sensibilidad del oído varía enormemente con la frecuencia. Pero no es sólo esto; para cada frecuencia fija la sensibilidad diferencial $\frac{\Delta P}{P}$ que nos permite distinguir cuándo el sonido cambia de intensidad, es sensiblemente constante entre los 100 y los 4000 c/s e igual a 0,10; de otra manera: *el oído no puede percibir variaciones de intensidad de sonido más que si la variación relativa de presión*

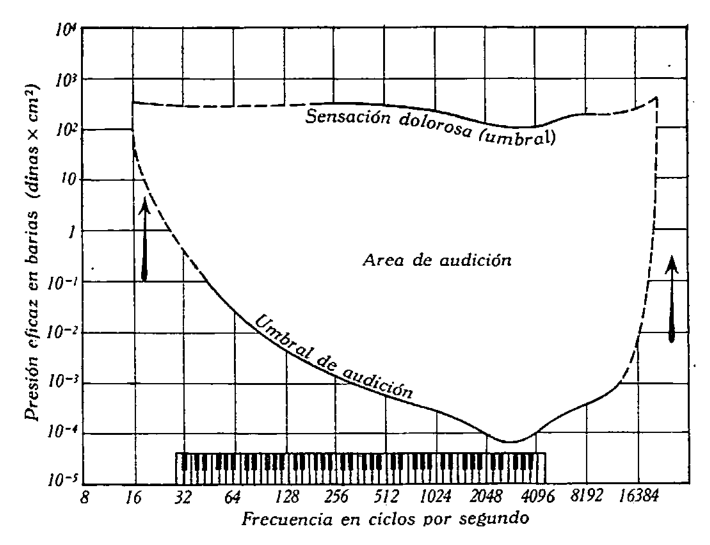


Fig. 156. Límites de audición

eficaz correspondiente es superior al 10 °/₀ de la presión inicial; esto entraña una variación logarítmica de la sensación con la presión eficaz, y a esa sensación se le llama *sonoridad.* Obsérvese que hemos dicho sensiblemente y que, además, la citada relación no es válida más que en un cierto intervalo de las frecuencias perceptibles por el oído; si la ley fuera rigurosamente válida para toda frecuencia (ley de Fechner), la sensación de sonoridad sería expresable en decibelios correctamente y los niveles de intensidad o físicos coincidirían con los de sonoridad o fisiológicos para cualquier sonido.

Que ello no es así lo han mostrado Flechtner y Munson en el año 1933 como resultado de una serie de medidas subjetivas con gran número de personas como objetos de experimentación, y cuyos resultados están representados en las curvas de la figura 157, las cuales representan para las distintas frecuencias niveles de sensación sonora o fisiológica (1). Como se ve, son verdaderas curvas de *respuesta invertida*

(1) Estas curvas han sido incorporadas en el American Standard for Noise Measurement, Bul. Z24,2, publicado por la American Standard Association, 1942.

del oído, puesto que en ellas se mantiene constante la sensación de sonoridad y se varía el nivel de intensidad para cada frecuencia. En ellas se ha tomado como *nivel cero* de sonoridad, el nivel acústico del sonido puro de 1000 c/s, a cero decibelios, lo que equivale a una energía sonora de 10^{-16} watios por cm^2, o sea 0,000204 barias, y los números escritos en cada curva son unidades de nivel fisiológico *(phons)*. Se ve que, para los 1000 c/s de referencia, los niveles acústico y fisiológico coinci-

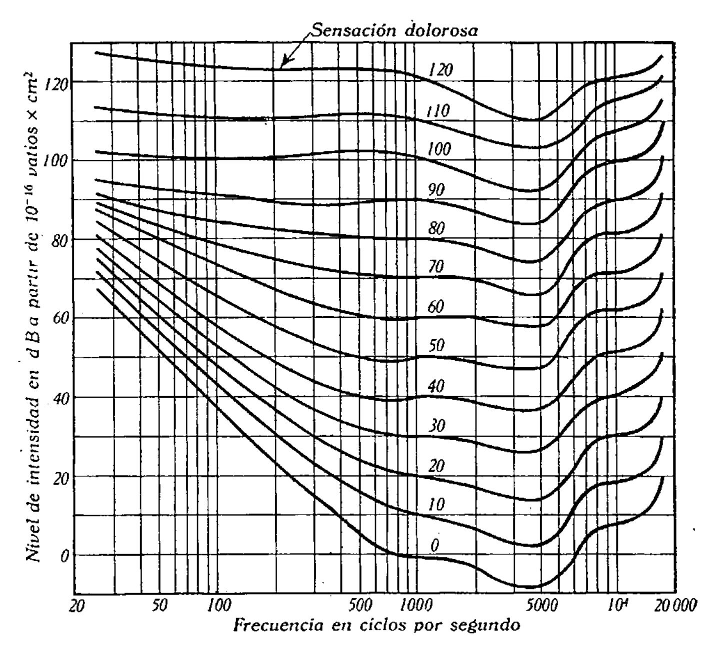


FIG. 157. Contornos de igual nivel sonoro. Cada curva representa la intensidad de sonido necesario a una frecuencia cualquiera para producir una sonoridad o fuerza igual a la que produce a 1000 c/s la intensidad indicada

den, es decir, el número de phons es igual al número de decibelios. En la figura 157 se ve la desviación entre los niveles acústico y fisiológico, los cuales deberían coincidir a toda frecuencia de ser rigurosamente válida la ley de Fechner.

En los sistemas de reproducción sonora eléctrica, la intensidad del sonido es directamente proporcional a la potencia eléctrica de salida, y los niveles de intensidad pueden expresarse, como veremos, en decibelios referidos a un nivel cero arbitrario. Dentro de ciertos valores de la intensidad y para frecuencias comprendidas entre unos 700 y 2000 c/s, la sensación de sonoridad es muy aproximadamente proporcional a la intensidad, pero no sucede igual fuera de ese intervalo, pues a bajas frecuencias, un pequeño cambio en intensidad produce un mayor cambio en sonoridad que a los 1000 c/s. Estas

consideraciones justifican plenamente el uso de la unidad de sonoridad que se llama *phon* (1).

Definición. Diremos que un sonido tiene una sonoridad de *n* phons cuando bajo ciertas condiciones, que especificamos a continuación, se le juzga a la escucha igual a un cierto tono standard, cuyo nivel de intensidad es *n* dB.

La sonoridad de un sonido se mide comparándola con la intensidad de un sonido standard de 1000 c/s, cuando un observador percibe la misma sonoridad para el sonido bajo prueba y dicho sonido standard, el cual ha de proceder de una onda plana sinusoidal pura originada en una posición directamente enfrente del observador y escuchando con ambos oídos; el nivel cero de referencia debe ser el que corresponde a una presión sonora de 0,0002 dinas por cm^2. El sonido de tono standard debe ser introducido alternativamente en un oído, por medio de un auricular y atenuador calibrado en términos de intensidad del tono standard y comparado simultáneamente con el sonido bajo prueba, tal como se oye con el otro oído; el número de decibelios del sonido tipo, será el de phons de sonoridad correspondiente al sonido bajo prueba (2).

De estas curvas se pueden sacar una serie de consecuencias, a saber:

a) La máxima sensibilidad del oído se encuentra entre los 3000 y los 4000 c/s.

b) Por encima y muy cerca de los 1000 c/s un incremento en el nivel de intensidad, produce sensiblemente el mismo incremento en sonoridad, mientras que en las altas frecuencias y particularmente en las bajas, pequeños incrementos en intensidad o nivel acústico producen grandes incrementos en sonoridad o nivel fisiológico. Así, a los 1000 c/s, se necesita un incremento de 80 dB para producir un incremento de 80 phons a partir del límite de audición, mientras que a 100 c/s sólo hacen falta 45 dB para pasar de la frontera de audición a los 80 phons; análogamente a 7000 c/s para el mismo número de phons se requieren 84 dB.

c) La respuesta en baja frecuencia del oído, a bajos niveles de intensidad es muy pobre y mejora a medida que aumenta el nivel acústico. Esto significa que la respuesta en baja frecuencia de un *altavoz*, a niveles bajos, *aparece* como muy pobre (con falta de frecuencias bajas), comparada con la que se obtiene a niveles acústicos más altos, para el oído del espectador. De aquí resulta también que si la música se reproduce a un nivel más bajo que aquel al cual ha sido ejecutada, pierde en calidad por una aparente pérdida de los «bajos»,

---

(1) De esta definición se deduce que esta unidad es puramente subjetiva y no tiene significado físico.

(2) Como se ve, hemos adoptado la designación de phons para unidad de niveles fisiológicos y el decibelio para los acústicos, lo que tiene la ventaja de saber a qué tipo de nivel se refiere una medida. Ambas medidas coinciden para 1000 c/s, pero para otras frecuencias sugerimos en la práctica el uso de la figura 157 con un alcance análogo al de curvas universales.

y es también por esta razón que muchos aparatos reproductores llevan controles de volumen automáticos *acústicamente compensados*, de que más tarde hablaremos.

Sensibilidad diferencial en frecuencia. Tono. El tono es la característica fisiológica o sensibilidad de nuestro oído a las variaciones de frecuencia. El oído humano es mucho más sensible a los cambios de frecuencia que a los cambios de intensidad; cuanto más alto es el nivel fisiológico del tono, menor es el tanto por ciento o sensibilidad diferencial mínima perceptible, y el oído se hace evidentemente menos sensible a los cambios de frecuencia a medida que ésta disminuye. Entre 500 y 10 000 c/s y para niveles de 40 phons, el límite de discriminación es menor de 0,005, y, por tanto, extrapolando la ley de Fechner, que aquí se aplica con mayor aproximación, se puede poner

$$H_{\text{octavas}} = lg_2 \frac{\nu_2}{\nu_1}$$

la unidad logarítmica se llama ahora *octava*, y al cociente ν_2/ν_1 *intervalo musical;* por consiguiente, dos tonos difieren en una octava cuando $\nu_2 = 2\,\nu_1$, y la diferencia de tono de dos sonidos de distintas frecuencias es igual al log_2 de su intervalo musical.

Estos resultados son sensiblemente válidos, si se supone que las frecuencias comparadas son escuchadas durante tiempo suficiente para ser bien percibidas; si el tiempo es excesivamente corto, el oído pierde su capacidad para reconocer el tono, y se tiene así una incertidumbre en la determinación del tono, que puede formularse así:

$$\Delta\nu \times \Delta t = 1,$$

en la cual $\Delta\nu$ es la inexactitud de la frecuencia y Δt el tiempo de escucha u observación (1).

De aquí resulta que para bajas frecuencias, la frecuencia de un sonido puro puede variarse rápidamente a lo largo de una octava sin que se perciba cambio de tono.

Timbre de un sonido compuesto. Es la cualidad de un sonido que se aprecia por las amplitudes relativas de los sonidos armónicos, respecto del fundamental en que se puede descomponer un sonido compuesto según la proposición de Fourier; en efecto, si se modifica la fase de uno de los armónicos, sin modificar su amplitud (lo que equivale a

---

(1) Esto constituye una ley semejante al *principio de indeterminación* de Heisenberg de la física cuántica, en el campo de la Acústica, según el cual, el producto de las incertidumbres de dos variables conjugadas de un sistema dinámico tienen como valor mínimo la constante de Planck $h = 6{,}55\ 10^{-27}$ ergios seg; véase, por ejemplo, GIL-SANTIAGO, *Nociones de mecánica cuántica*, publicado en «Metalurgia y Electricidad», 47-48-51 de 1941.

modificar la forma de la onda, figura 158 *c*). se observa que el timbre no cambia, y es en este sentido en el que se debe interpretar la afirmación corriente de que *el oído no es sensible a las fases.*

Se ha comprobado experimentalmente que las altas frecuencias, esto es, las frecuencias por encima de los 1000 c/s, son necesarias para la inteligibilidad de la conversación y que son esas frecuencias las que dan *brillantez* al sonido; por el contrario, las bajas y muy bajas frecuencias son también necesarias para mantener una gran cualidad en la voz y la música, y con referencia al cine sonoro dan *presencia* a la escena en la pantalla. De ello nos ocuparemos en detalle más adelante.

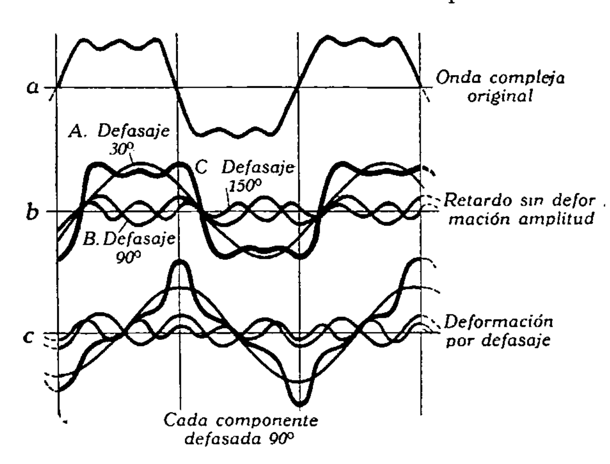


FIG. 158. Deformación por defasage y retardo

Tonos subjetivos y enmascaramiento. El oído tiene una respuesta que no es lineal para ondas sonoras de gran amplitud. De aquí resulta, como se demuestra fácilmente por un cálculo matemático en el que no entraremos, que con ondas sonoras de gran energía, el oído produce armónicos, y tonos de suma y diferencias de frecuencias, los cuales no estaban presentes en el sonido original, pero que aparecen en los órganos de audición y se transmiten al cerebro. Tales frecuencias producidas en el oído se llaman *tonos subjetivos* y explican multitud de fenómenos sonoros. Por ejemplo: el timbre de un sonido no se altera si se suprime la onda fundamental, porque los armónicos le vuelven a engendrar por diferencia en el oído, en forma subjetiva. Por la misma causa muchos receptores de radio y altavoces pasan por aceptables, porque engendran, en forma subjetiva, tonos bajos que dichos aparatos son incapaces de radiar.

Por último, otra consecuencia importante de la respuesta no lineal del oído es el llamado *enmascaramiento* que aparece como una sordera a los sonidos de alta frecuencia, causada por la presencia de un sonido de tono bajo. En efecto: como el oído produce armónicos subjetivos de las bajas frecuencias, estos armónicos interfieren con los sonidos originales de alta frecuencia que son entonces anulados o enmascarados. Este defecto es particularmente notable en sitios de mucho ruido, en los que ello es equivalente a una sordera, y es la razón por lo que es necesario elevar la voz en tales lugares, para lograr sostener una conversación. También de esto hablaremos después con más detalle, dado

el interés que puede tener en la reproducción de la voz, en ambientes con alto nivel de ruido.

Audición biaurial y localización del foco sonoro. Es un hecho bien conocido que una persona que escucha con los dos oídos puede distinguir si el sonido llega de la derecha o de la izquierda, mientras que si se le obtura un oído, tal capacidad desaparece. Este efecto fué estudiado por primera vez por Rayleigh, quien llegó a la conclusión de que tenía su origen en la diferencia de tiempo con la cual son impresionados por el sonido ambos oídos. Una serie de experiencias, en las que no vamos a entrar, han permitido determinar que el cerebro aprecia una diferencia mínima del momento de impresión para ambos oídos y para un tono puro, de valor 1/30000 de segundo, lo que teniendo en cuenta la velocidad del sonido equivale a una diferencia de marcha de 1 cm. Si llamamos a la distancia entre ambos oídos (nuestra base acústica, que oscila entre 18 y 21 cm) y Φ al ángulo de inclinación de un tren de ondas con respecto al plano de simetría de nuestra cabeza, resultará que la diferencia de tiempo entre los momentos de incidencia del sonido procedente del mismo foco, en ambos oídos, será

$$t' - t = \frac{\delta}{c} = \frac{a \operatorname{sen} \Phi}{c}$$

y para que sean perceptibles como separados por el cerebro, deberá ser

$$\frac{a \operatorname{sen} \Phi}{c} \geq \frac{1}{30\,000} \quad ,, \quad \operatorname{sen} \Phi \geq \frac{1}{a}$$

lo que, para imprecisión en la dirección del foco, da:

$$\varphi = \frac{1}{18} \simeq 3^\circ$$

El caso más favorable se tiene cuando el foco está sobre la línea que forma la base acústica, porque entonces la diferencia de marcha es máxima, y también la diferencia de tiempo de impresión en cada oído, y esto es lo que instintivamente hacemos para localizar un foco de sonido.

Stewart ha proseguido estos estudios con dos tonos de la misma intensidad y fase variable, habiendo encontrado que, cuando se aplican a cada oído, la dirección aparente del foco de sonido respecto al plano meridiano de la cabeza, que pasa por la nariz, forma un ángulo que, expresado en grados, es proporcional al defasaje entre ambos tonos. También se ha encontrado que la relación entre el defasaje de los dos tonos y el desplazamiento aparente del foco aumenta linealmente con el incremento de frecuencia. Esto indica que la posición aparente del foco depende solamente de la diferencia de llegada de la misma fase a los dos oídos. Así resulta que si sonidos de varias frecuencias se radian desde un mismo foco simultáneamente, la diferencia de lle-

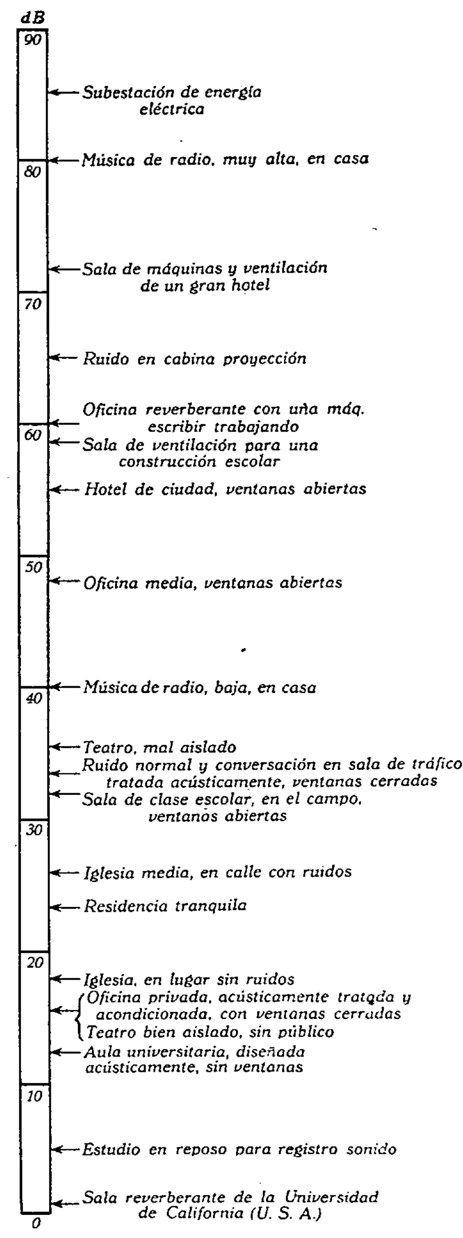


FIG. 159. Algunos niveles de ruidos

gada de la misma fase a ambos oídos será la misma para todas las frecuencias, y la posición aparente del foco será la misma para cada frecuencia, lo que está de acuerdo con los hechos.

Este efecto biaurial sólo se realiza para bajas frecuencias, y Stewart ha determinado que su límite superior es de 1260 c/s por término medio; él constituye en realidad el origen del sonido estereofónico o sonido en relieve, actualmente en proceso de desarrollo.

Si se aplican dos sonidos de frecuencias poco diferentes, una a cada oído, la combinación da la apariencia de un solo foco, el cual parece moverse alrededor de la cabeza cuando la diferencia de fase entre los dos tonos en cada oído cambia. El foco no se mueve en un círculo completo alrededor de la cabeza, sino que bruscamente salta de un lado a otro y se mueve a lo largo de medio círculo (OLSON-MASSA).

Ruidos. (1) Todos los sonidos que oímos pueden clasificarse en musicales y no musicales, aunque algunos sonidos, como los de las vocales de la conversación, posean ambas características; en general, los sonidos musicales están constituídos por vibraciones periódicas regulares, mientras que los no musicales lo están por vibraciones irregulares; entre éstos, el más conocido es el *ruido* formado por un conglomerado

(1) Para un estudio completo del ruido y su medida, véase *The Noise Premier*, de la General Radio C°, 1943.

de toda suerte de vibraciones y lleno de impulsos transitorios y componentes disonantes o inarmónicos. La medida física del ruido se debiera efectuar midiendo la presión máxima o de cresta en barias; pero esto no daría una idea, a una persona no técnica, de la magnitud de los diferentes ruidos, y de aquí que se utilice como unidad el nivel sonoro del mismo, existiendo entre ambos la relación antes dada:

$$L_{dB} = 20 \cdot \log \frac{p_2}{p_1};$$

en la figura 159 se representan los niveles de los ruidos más usuales como resultado de las observaciones medias de una serie de experimentadores, y la tabla siguiente da la relación entre los niveles logarítmicos y las intensidades correspondientes de sonidos:

Decibelios	Presión sonora o velocidad de la partícula	Intensidad relativa. Microvatios/cm²
0	1	1
10	$10^{0,5}$	10
20	10	10^2
30	$10^{1,5}$	10^3
40	10^2	10^4
50	$10^{2,5}$	10^5
60	10^3	10^6
70	$10^{3,5}$	10^7
80	10^4	10^8
90	$10^{4,5}$	10^9
100	10^5	10^{10}

Las escalas musicales

Ya hemos visto que la elección de la unidad *octava* para medir los tonos de los sonidos puros, tiene un origen puramente fisiológico y, por tanto, es natural que sea la adoptada también en Música, donde no interesan tanto los tonos o frecuencias absolutas como sus intervalos o tonos relativos, tal como antes lo hemos definido.

Se llama *escala o gama musical* un conjunto de notas o sonidos de diverso tono, ordenados según intervalos escogidos. Pueden establecerse infinitas escalas musicales, quedando fijada cada una cuando se dé la nota o sonido fundamental, y la serie de intervalos que fijan las notas sucesivas; en la actualidad existen tres escalas: la escala *diatónica o gama natural* de Zarlin, *la escala cromática* y *la escala temperada.*

La escala diatónica está formada por las siguientes notas fundamentales, cuyos intervalos respecto a la nota de referencia de la escala (435 vibraciones completas por segundo a 15°, nota del diapasón

llamado normal) e intervalos entre cada dos notas sucesivas se dan a continuación:

Nota musical	Tono relativo	Nombre del intervalo	Intervalos sucesivos	Nombre del intervalo (1)
do	1	Unísono	9/8	Tono mayor
re	9/8	Segunda mayor	10/9	» menor
mi	5/4	Tercera mayor	16/15	Semitono mayor
fa	4/3	Cuarta	9/8	Tono mayor
sol	3/2	Quinta	10/9	» menor
la	5/3	Sexta	9/8	» mayor
si	15/8	Séptima	16/15	Semitono mayor
do	2	Octava		

La necesidad de no tener un número demasiado considerable de notas diferentes en una octava, ha conducido a tomar la base de logaritmos lo menor posible, es decir, dos.

Esta escala de siete notas se continúa por arriba y por debajo, formando otras escalas o gamas que se designan con subíndices: do^2 do^3..., la^2 la^3... y do_2 do_3, la_2 la_3, que indican los órdenes de los armónicos para los subíndices positivos y frecuencias mitad, $^1/_3$, $^1/_4$, etc., para los negativos; así el tono de

$$la^2 \text{ será } 435\ \frac{5}{3}\ 2, \quad \text{y el de} \quad la_3 = \frac{435}{3} \cdot \frac{5}{3}$$

Siendo los intervalos del tono mayor y del menor $\frac{9}{8}$ y $\frac{10}{9}$ grandes respecto al semitono mayor $^{16}/_{15}$, los dos primeros se dividen en dos semitonos intercalando notas entre las *do, re* y *mi,* así como entre las *fa, sol, la* y *si,* que son en el caso del piano las teclas negras intercaladas entre las blancas, que son las de la gama. Para realizar esta intercalación tenemos que pasar de una nota a otra con mayor o menor número de vibraciones. Si se aumentan éstas multiplicando por $^{25}/_{24}$, la nota resultante se llama *sostenido* y se escribe ♮; si se disminuyen multiplicando por $^{24}/_{25}$, la nueva nota se llama *bemol* y se escribe ♭; aumentar o disminuir una nota en tales proporciones se dice *sostener* o *bemolizar* esa nota. Prácticamente, el sostenido de una nota se confunde con el bemol de la siguiente de la escala, pero en la práctica existe una pequeña diferencia que es el *coma.* La escala así formada con la intercalación de sostenidos y bemoles se denomina *cromática;* y tiene el inconveniente de la desigualdad de los intervalos.

---

(1) A veces se emplea también el intervalo $\frac{6}{5}$ llamado tercera menor y el coma o intervalo entre el tono mayor y el tono menor, que vale $\frac{81}{80}$

En la escala *temperada* se evita este inconveniente dividiendo el intervalo total en doce semitonos iguales, con lo que se divide la octava en intervalos que valen $\sqrt[12]{2} = 1{,}0595$; esta escala se llama también de los *físicos* y se emplea en órgano y piano.

En la escala cromática, por orden creciente de frecuencias, las notas son:

	do ♯		*re* ♯		*fa* ♯		*sol* ♯		*la* ♯		
do		*re*		*mi, fa*		*sol*		*la*		*si, do*	
	re ♭		*mi* ♭		*sol* ♭		*la* ♭		*si* ♭		

Como nota patrón se ha elegido internacionalmente 435 vibraciones completas por segundo a 15°, nota emitida por el llamado *diapasón normal,* (1) pero hay escalas basadas en 426,667 y 440. El *acorde* o *armonía,* es el resultado de llegar simultáneamente al oído dos sonidos, mientras que si llegan sucesivamente, forman una *melodía.*

Dado que dos tonos puros de frecuencias muy próximas producen en el oído una impresión desagradable, cuando el intervalo musical entre dos tonos no sea un entero o una fracción sencilla $^3/_2$, $^5/_4$, etc., los armónicos de estos sonidos tendrán frecuencias muy próximas y producirán impresión desagradable; se dice que son *disonantes* o que el acorde es disonante; por el contrario, si el intervalo musical es un entero o una fracción simple, los armónicos de los dos tonos se confundirán y se dice entonces que el acorde es *consonante* por ser grato al oído.

Acordes musicales. El conjunto de dos o más sonidos simultáneos se llama acorde musical, que podrá ser consonante o disonante. Entre los acordes de tres notas merecen especial mención, por su importancia, el *perfecto mayor,* formado por una nota (la fundamental del acorde), su tercera mayor y su quinta, cuyos sonidos tienen frecuencias que son entre sí como $1 : {^5/_4} : {^3/_2}$, o sea, como $4 : 5 : 6$, y el *perfecto menor,* constituído por otra nota fundamental, su tercera menor y su quinta, que están entre sí en la relación $1 : {^6/_5} : {^3/_2}$, o sea, como $10 : 12 : 15$; el perfecto mayor lo forman las notas *do, mi, sol* de una gama, y el menor los *do, mi bemol, sol* también de una gama. En la figura 159 bis se representa el espectro de los distintos instrumentos musicales; en ella las designaciones *A, B, C, D, E, F* y *G,* según es costumbre usual en las notas, equivalen respectivamente *la, si, do, re, mi, fa, sol.*

Bandas de frecuencias perceptibles

La gama de frecuencias que un *escucha* percibe depende: de su capacidad innata para oír, del nivel medio, de la composición espectral del sonido, y últimamente y en alto grado para la determinación

(1) Se la llama *la normal* o *la* de la tercera gama, la_3.

de las condiciones finales, del nivel y carácter del ruido de fondo del ambiente en que él esté sumergido.

Todos estos factores son variables. El primero de ellos difiere ampliamente entre la gente. La gama máxima que un individuo puede percibir con agudeza auditiva, *cuando el sonido está cerca de la línea de dolor*, es de 16 a 22 000 c/s. Cuando la intensidad decrece, la gama de frecuencias perceptible se acorta en ambos extremos. Solamente el 5% de la población es capaz de percibir una gama tan amplia de fre-

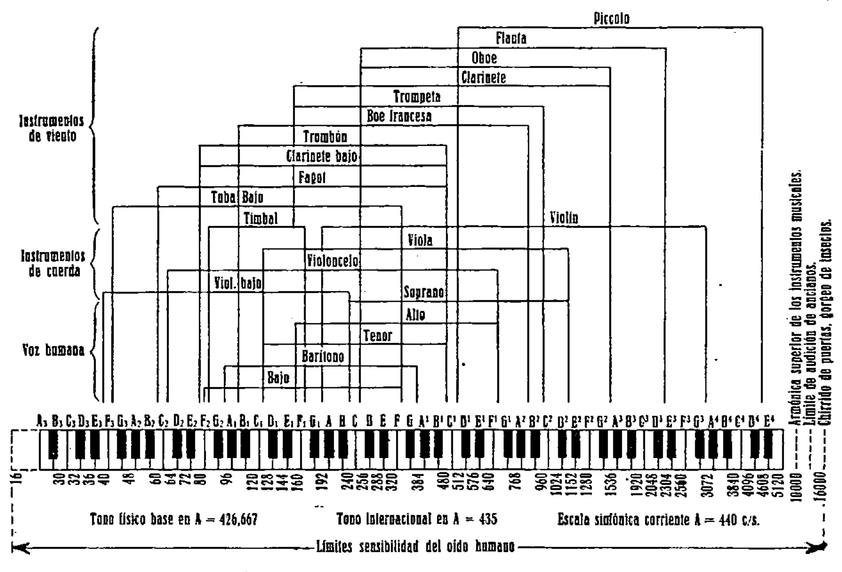


FIG. 159 bis. El espectro audible

cuencias, aun a la máxima intensidad. La gama *media* para la población es de 20 a 15 000 c/s a un nivel de 120 dB, y para el 5 % con agudeza más pobre esta gama se reduce a 25 a 7000 c/s. Todas estas cifras se refieren al umbral del dolor y no representan la situación a los niveles usuales de percepción, en que la gama percibida es mucho menor. El aspecto estadístico de los contornos de audición para estos grupos de población se ve en la figura 160, tomada de un trabajo de Fletcher con más de 500 000 personas. Esta prueba se ha realizado incluyendo gentes de ambos sexos, tomando en cuenta las variaciones con la edad, y diferencias reales de audición entre hombre y mujer. De este modo, es posible definir con bastante seguridad estadística la habilidad de audición de un *escucha medio* y de un *escucha crítico*. Vamos a utilizar estos dos contornos como datos fundamentales para determinar las gamas perceptibles sujetas a los efectos de enmascaramiento de diversos niveles de ruidos.

El ruido es otro elemento altamente variable. Es mucho mayor en verano que en invierno. depende de la localidad, siendo mayor en

centros de tráfico que en los suburbios, de la cantidad de gente en una sala, y de la proximidad de equipos mecánicos, siendo variable de un instante a otro. El ruido actúa como si ensordeciese a los individuos sumergidos dentro de él. Para un particular nivel y una distribución espectral particular de ruido, resulta un contorno de enmascaramiento, que define el nivel de intensidad a cada frecuencia simple, que sería audible al escucha, con tal de que su umbral normal (en ausencia de ruido) sea igual o más bajo que el contorno de enmascaramiento.

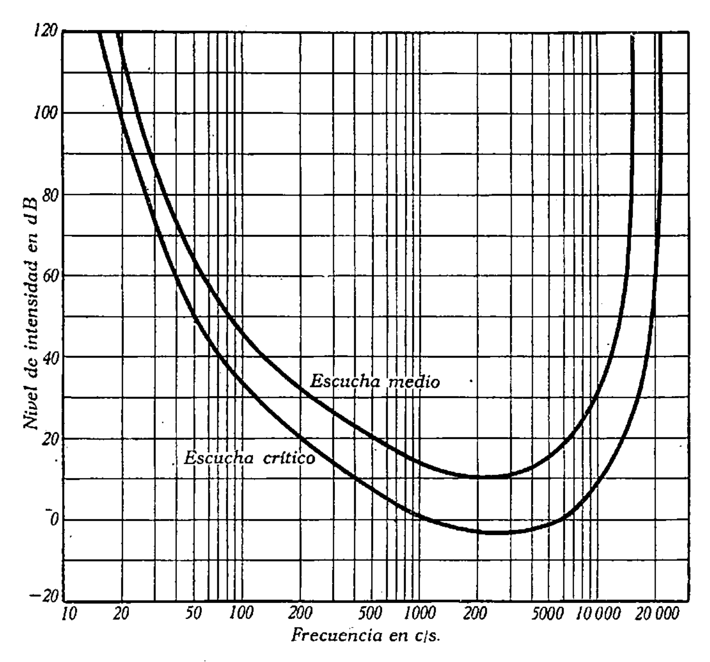


Fig. 160. Contornos de audición para escucha medio (Población media) y crítico (5 % de mayor agudeza), en ausencia de ruido

Seacord ha publicado los resultados de 2 200 medidas de ruidos en salas, y demuestran que el ruido anual medio de una residencia es de 43 dB. Solamente el 5 % de las residencias tienen niveles de ruido de 33 dB o menos. Esto nos permite determinar dos niveles de ruido significativos en residencias, para los cuales puede obtenerse los correspondientes niveles de enmascaramiento, asignando distribuciones espectrales típicas de ruido y calculando los contornos de enmascaramiento de ese espectro: tales contornos se muestran en la figura 161.

De muy diversas maneras podremos ahora combinar los contornos normales de audición con los contornos de enmascaramiento, para que nos permitan determinar la capacidad de un *escucha estadístico* para oír en presencia de tipos representativos de ruidos. Para

nuestra finalidad consideraremos el promedio que representa una gran parte de la población y que se obtiene pareando la agudeza media de audición con el contorno de enmascaramiento que corresponde a un

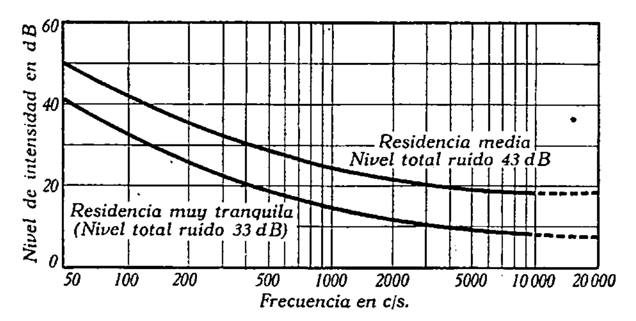


FIG. 161. Contornos de nivel de enmascaramiento para ruidos en residencias medias y muy tranquilas

ruido residencial medio. Aunque sólo alcance al 1 % de la gente, vamos a examinar también el caso de combinar la agudeza de audición y el contorno de enmascaramiento para la máxima gama perceptible de frecuencias. Podemos tomar la agudeza de nuestro escucha crítico

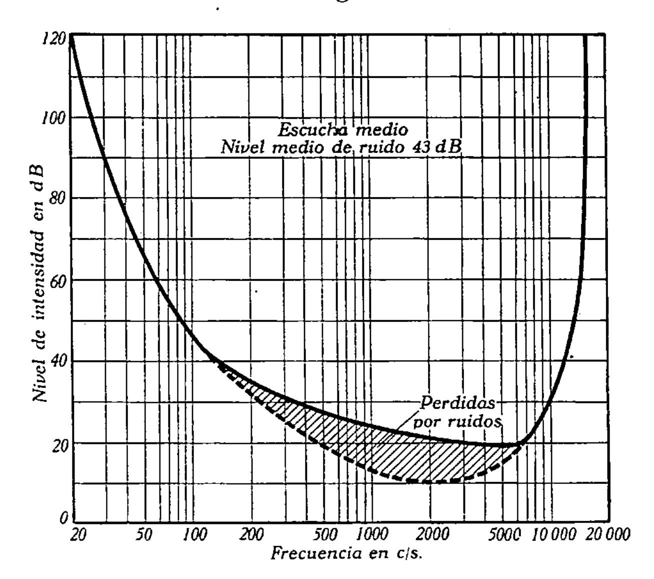


FIG. 162. Contorno efectivo de audición para un escucha medio sumergido en un ruido medio

—definido previamente— y parearla con el enmascaramiento de un ruido de 33 dB. Los contornos para estos dos casos están mostrados en las figuras 162 y 163.

Naturaleza de la música. Describir la música en términos físicos es excesivamente difícil. En música de orquesta sinfónica, conocemos probablemente la clase y número de instrumentos, pero las composiciones y técnica del director en la ejecución introducen, según parece, casi un ilimitado número de variables en frecuencia e intensidad. La única posible aproximación a la solución es el uso de muestras y análisis estadísticos de los datos. Sivian, Dunn y White han tomado tales

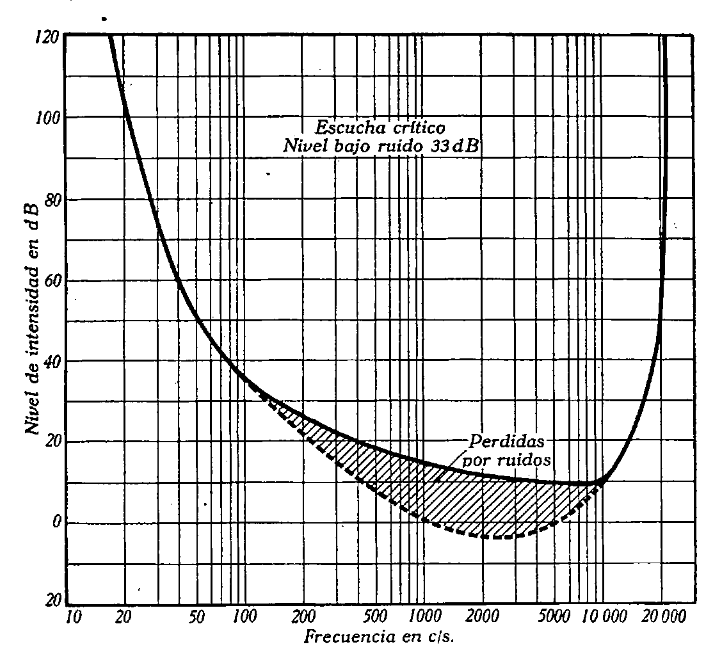


FIG. 163. Contorno efectivo de audición para escucha crítico sumergido en un nivel bajo de ruidos

modelos de un pequeño número de orquestas, ejecutando una variedad de diferentes composiciones. Mediante el uso de filtros de banda y el empleo de un sistema contador que emplea tubos de gas (1), dispuestos para lucir a intervalos de niveles sobre la banda de niveles considerados, se pudo obtener la distribución en niveles de presión sonora para bandas de frecuencias que cubren el espectro musical completo.

Después de introducir adecuadas correcciones, Fletcher ha determinado los máximos valores cuadráticos medios, en intervalos de $^1/_4$ de segundo, y en bandas críticas de frecuencias, a una distancia de 20 pies, para música de orquesta sinfónica y basada en los datos

(1) Tubos de descarga luminescente calibrados para distintos niveles de entrada en ellos.

antes referidos. Estos máximos cuadráticos medios son los valores *efectivos* de las *intensidades de cresta*, como son percibidos por el oído. (La intensidad de cresta se define como el nivel de intensidad que es excedido solamente el 5 % del tiempo, en la particular banda crítica de frecuencias). Si ahora el nivel total de reproducción es tal, que el nivel máximo cuadrático medio de intensidad en una particular banda de frecuencias es justamente igual al nivel de enmascaramiento, entonces las componentes de la música en esta región no serán nunca oídas. Además, puesto que las intensidades de cresta ocurren con

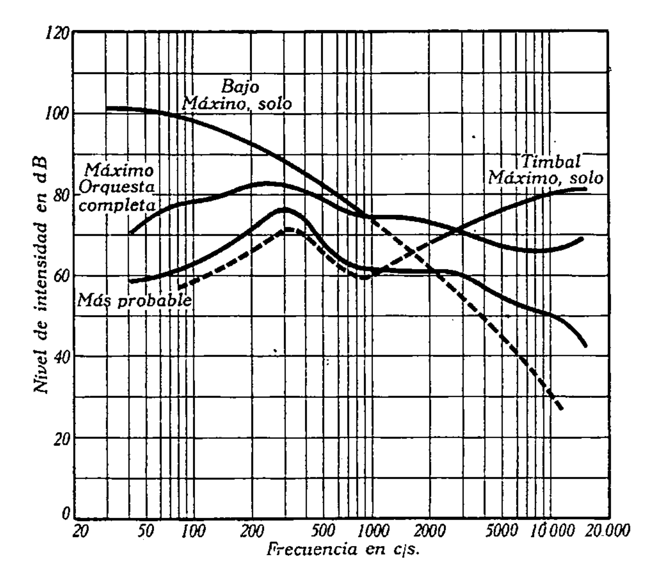


FIG. 164. Máximos y más probables niveles en bandos de frecuencias críticas para música en orquesta sinfónica con 20′ de distancia e intervalos 1/4 seg.

relativa poca frecuencia, el nivel medio estará considerablemente debajo del nivel de enmascaramiento. Por esta razón parece que debe proporcionar un resultado más representativo en la gama perceptible de frecuencias, el uso de nivel de intensidad medio, o estadísticamente más probable.

El *nivel más probable*, en una banda crítica de frecuencias, es más bajo que el nivel máximo. Los valores calculados por Glover impublicados, a partir de los datos originales, están mostrados en la figura 164 juntamente con los valores máximos de Fletcher. A 300 c/s la intensidad más probable es 7 dB debajo del máximo, mientras que para las frecuencias hasta 5000 c/s, el medio está 12 dB por debajo del máximo. Por encima de este punto, la divergencia es todavía mayor, estando el valor más probable o medio 28 dB debajo del máximo a los 15 000 c/s.

Si adoptamos ahora la curva de nivel de intensidad más probable, como la distribución espectral más representativa del nivel medio de intensidad acústica encontrada en la escucha de la música de orquesta sinfónica, estaremos en posición de determinar la gama de frecuencias perceptibles, sobre bases estadísticas, utilizando los contornos efectivos de audición para el escucha medio y para el escucha crítico, mostrados en las figuras 162 y 163.

La posición de la curva del nivel de intensidad más probable está determinada por el nivel total de reproducción. En la figura 164

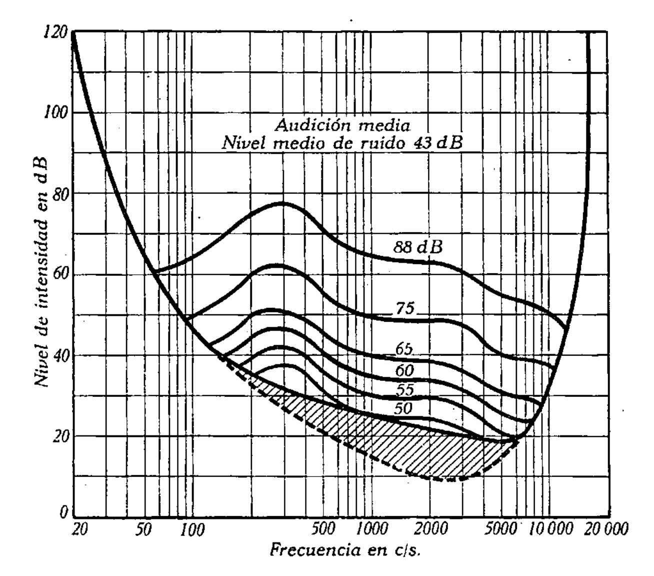


Fig. 165. Bandas de frecuencias perceptibles a varios niveles de reproducción para un escucha medio

se le muestra para salas de concierto a niveles dados a 20 pies de la orquesta, y para un gran nivel medio total de 88 dB. De los datos de Seacord, se ha podido estimar que el nivel total medio para reproducción de radio en viviendas es de 55 dB en posiciones probables de escucha. Por consiguiente, considerando un sistema ideal de transmisión y reproducción, pueden determinarse los límites de frecuencia perceptibles, dentro de casa, bajo condiciones medias, rebajando la curva en 33 dB y anotando las frecuencias en las cuales es cortada la curva umbral de audición. La manera según la cual la gama perceptible varía con el nivel de reproducción, puede ser estudiada, similarmente, elevando o rebajando la curva.

Este proceso está ilustrado en la figura 165 en el caso del escucha medio. Para niveles de reproducción por debajo de 60 dB se ve que las frecuencias límites están determinadas puramente por el contorno normal de audición. Al nivel medio de radio, 55 dB, el enmascaramien-

to debido al ruido es ya apreciable, y los límites perceptibles son de 175 a 5800 c/s. Cuando el nivel decrece, el efecto de enmascaramiento crece muy rápidamente. A un nivel de 50 dB, es decir, sólo 5 dB debajo del supuesto nivel medio de radio, la gama es restringida entre 220 y 3300 c/s y el enmascaramiento medio cae entre 700 y 1200 c/s; muchos radiorreceptores operan a niveles tan bajos. Es interesante notar que, en completa ausencia de ruido, la gama perceptible se extiende de 200 a 5000 c/s, al mismo nivel de reproducción. Un nivel de reproducción de 50 dB parece ser el más bajo que puede pedir un escucha medio, y presentar un interés o validez en la calidad de la reproducción. A este respecto debe recordarse que este análisis está basado *en un sistema de transmisión y recepción ideal, que es capaz de reproducir una ilimitada gama de frecuencias con completa uniformidad.*

Es sabido que la gran mayoría de los receptores de AM [1] no tienen una respuesta uniforme y reproducen una gama limitada, determinada principalmente por los circuitos selectivos de radiofrecuencia. Así, pues, para el actual radioescucha, la gama perceptible puede ser mucho menor que la dada aquí, lo que depende de la característica del receptor y sistema reproductor de sonido, y del nivel de la reproducción.

En la figura 165 se observa que el efecto de enmascaramiento es mayor para las altas frecuencias: el oído es el factor que controla el extremo de las bajas frecuencias, excepto a niveles anormalmente bajos. En el extremo de la alta frecuencia, el oído determina la frecuencia de corte a niveles por encima del nivel medio, mientras que para niveles más bajos que el medio, ese límite es determinado por el enmascaramiento debido al ruido.

Por el mismo proceso, la gama perceptible puede determinarse para un escucha crítico a un bajo nivel de ruido. El resultado para ambos tipos de escuchas se encuentra resumido en la figura 166, para niveles usuales encontrados en viviendas.

Es claramente evidente que bajo las condiciones ideales admitidas de perfecta transmisión en viviendas, el escucha es solamente capaz de percibir una gama restringida de frecuencias. Para el escucha medio (al nivel medio de reproducción), la gama de 175 a 5800 c/s representa sólo el 62 % del número total de octavas supuestas transmitidas en la gama total de 40 a 15 000 c/s. El escucha crítico tiene una evidente ventaja, porque bajo las condiciones supuestas, es capaz de percibir de 120 a 12 000 c/s, lo que representa el 81 % del total de octavas transmitido. La gama de frecuencias es más grande para niveles más altos, y más estrecha para niveles más bajos, como se indica en la figura 166. Las partes blancas indican la obliteración debida al enmascaramiento en la gama de las frecuencias medias.

---

(1) AM quiere decir receptores capaces de recoger emisiones moduladas en amplitud por contraposición a los FM, que se refieren a modulación en frecuencia.

Diferencias en límenes. El análisis anterior nos da una imagen de las gamas perceptibles para un sistema perfecto de transmisión, operando a varios niveles de reproducción en viviendas. Nos da estadísticamente cuál es la situación a un nivel promedio, y a otro cualquier nivel. Si estuviésemos interesados en determinar la mayor gama útil, entonces deberían examinarse las condiciones a más alto nivel que el nivel medio.

La misma figura 166 muestra que, a un nivel de reproducción de 75 dB, el escucha crítico puede percibir de 60 a 15 000 c/s, mientras

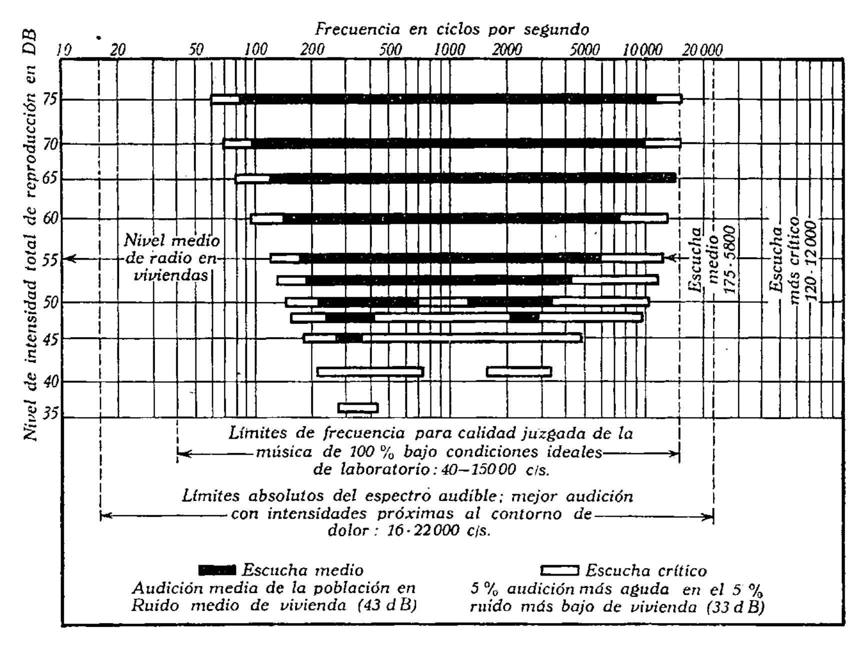


Fig. 166. Bandas estadísticas de frecuencias percibidas, limitadas por la audición y ruido. Basadas en los niveles más probables en bandas críticas de frecuencias de música de orquesta sinfónica

que para el escucha medio esa gama vale de 85 a 11 000 c/s. Este nivel de reproducción es 13 dB inferior al nivel supuesto en una sala de conciertos y representa probablemente el máximo que por término medio puede utilizarse en viviendas. Ahora bien, dado que esas frecuencias se aproximan a los requerimientos ideales, interesa conocer en qué extensión un escucha puede detectar cambios en el extremo superior de la gama de frecuencias.

Ganett y Kerney han determinado el mínimo cambio de ancho de banda perceptible por comparación directa de las gamas en litigio. Sus pruebas fueron efectuadas con una gran variedad de programa musical y con un muy bajo nivel de ruido, 30 dB, utilizando una media de sesenta observadores, ingenieros acostumbrados a juzgar

de la calidad de programas musicales. La *diferencia en limenes* o umbrales se tomó como la diferencia mínima en ancho de banda (esto es, la diferencia en la frecuencia alta de corte), cuando el 75 % de los observadores identificaba correctamente el ancho de las dos bandas presentadas para comparación.

Es razonable admitir que la diferencia de un limen es equivalente a: 1.°, la diferencia en ancho de banda que es realmente detectable por la mitad del número de espectadores; 2.°, al umbral de percepción de la diferencia en el ancho de banda, para el cual hay todavía

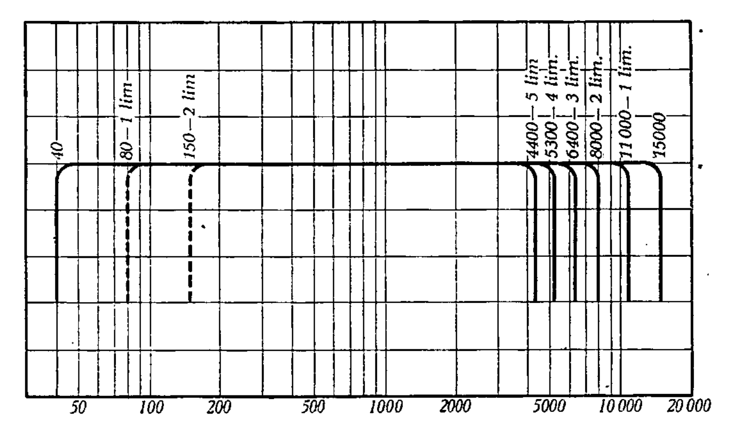


FIG. 167. Bandas de transmisión diferenciables por una línea, para música, según Gannet y Kerney

un discernimiento del escucha. La sensación debida al cambio de una diferencia de un limen se define como la *unidad liminal,* y adoptaremos para ella la notación *lim.*

El resultado de estas pruebas puede darse en una familia de características de transmisión como en la figura 167. (Ellas son para la música; para la conversación, la unidad liminal es aproximadamente dos unidades liminales de la música). En ella las frecuencias de corte difieren en un lim. Así, por ejemplo, 11 000 c/s es 1 lim más bajo que el total espectro musical de 15 000 c/s; 8000 c/s está 2 lim por debajo de la escala total y 1 lim por debajo de los 11 000 c/s, etc. Los pasos de 1 y 2 lim por las bajas frecuencias son materia de conjetura según Gannett y Kerney, y no han sido establecidos mediante pruebas.

El entrenamiento previo de estos equipos de observadores de pruebas, el relativamente alto nivel de reproducción y el uso repetido de comparaciones directas conduce indudablemente a resultados, en valores liminales, que son demasiado pequeños para las condiciones de escucha en viviendas, o para demostraciones comerciales de radioreceptores. El escucha medio raramente tiene la oportunidad de hacer una comparación directa que *abarque cambio de banda solamente,* bajo condiciones propiamente controladas. Más aún: es imposible

apreciar propiamente diferencias relativamente pequeñas en el ancho de banda, si la respuesta característica difiere aunque sea ligeramente, sobre todo cerca de la región del espectro que se va a juzgar. Esta dificultad existe cuando se comparan dos productos comerciales diferentes. En condiciones ordinarias, pues, el uso de valores liminales conducirá a gamas perceptibles muy espaciadas o más distantes que las antes obtenidas.

Si, como hemos visto, previamente el escucha crítico puede percibir una frecuencia límite de 15 000 c/s a un nivel de reproduc-

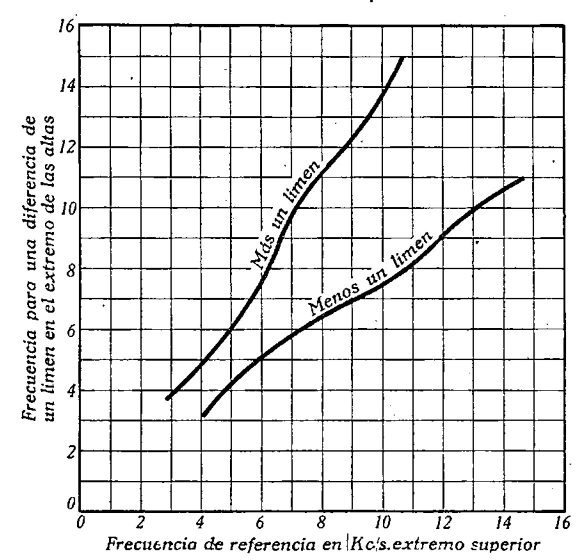


Fig. 168. Frecuencias para una diferencia de una línea en más o en menos en el extremo de los altos

ción de 75 dB, la gama de frecuencia puede ser reducida a 11 000 c/s (—1 lim) sin diferencia perceptible, y, por consiguiente, 11 000 c/s es la máxima frecuencia que precisa ser reproducida para el escucha crítico. Análogamente, para el escucha medio, que puede percibir 11 000 c/s como frecuencia límite superior, una frecuencia máxima de 8000 c/s es suficiente. Estas frecuencias límites parecen ser las máximas que pueden económicamente justificarse para la reproducción en viviendas y esta clase de escuchas.

La magnitud de los intervalos de frecuencia para una unidad liminal proporciona una medida útil del efecto de los cambios en la frecuencia límite superior. La figura 168 permite determinar la frecuencia correspondiente a una unidad liminal en más o en menos, a partir de una frecuencia de referencia; así, supongamos que un sistema transmite a 9000 c/s y se trata de averiguar en qué extensión debe prolongarse la gama para que haya un cambio perceptible. De la citada figura se ve que para +1 limen, a 9000 le corresponden 12 200 c/s,

y, por tanto, hasta esta frecuencia debe extenderse la gama; si, por el contrario, tenemos un sistema que transmite hasta los 10 000 c/s y se desea reducir la gama tanto como sea posible sin introducir más cambio que el justamente perceptible, la misma figura nos da para —1 limen y con 10 000 c/s, el valor 7400 c/s.

Naturaleza de la respuesta característica. Si deseamos reproducir música con absoluta fidelidad, no solamente la banda de frecuencias debe ser adecuada tal como se ha discutido previamente, sino que también la característica de transmisión debe ser uniforme sobre toda

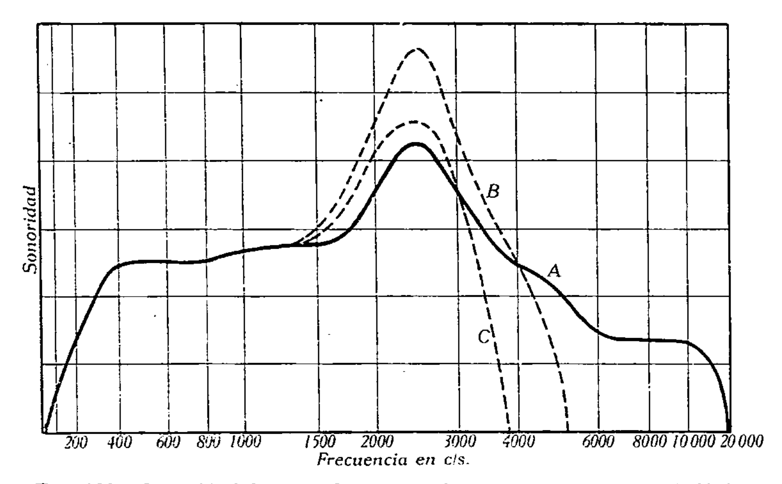


Fig. 169. Sonoridad frente a la frecuencia, para una orquesta sinfónica

la banda. Una fidelidad absoluta de este tipo es difícil de obtener en la práctica, a menos de tratarse de un equipo especial de laboratorio; sin embargo, es posible obtenerla con suficiente uniformidad, en un sistema reproductor que esté bien diseñado. Para lograr esto sobre bandas extensas de frecuencias, se requiere un sistema de altavoces múltiples, que, aparte de otras circunstancias, permita una solución cuidadosa del problema de la distribución espacial uniforme de las altas frecuencias.

En tiempos pasados, todos los fabricantes de aparatos receptores de radiodifusión han considerado deseable utilizar altavoces que contribuyan a la aparente sensibilidad del aparato, lo que dió por resultado que la gran mayoría de los altavoces tenían incrementada la respuesta en las medias-altas frecuencias, al objeto de obtener una alta eficiencia en sonoridad; esto da la explicación de la universal aceptación del control de tono, que reduce drásticamente la respuesta en alta frecuencia.

Tal situación se ilustra en la figura 169, que muestra en la curva *A* la sonoridad, versus las frecuencias, para música de orquesta sinfónica

(según Fletcher). Se observa que el oído es más estimulado en la región de los 2000 a 3000 c/s, a pesar de que los máximos y más probables niveles de intensidad se encuentran en la región de los 200 a 400 c/s, tal como se vió en la figura 164. Si esa música se reproduce con un altavoz en que la respuesta en la media-alta frecuencia se ha acentuado, el escucha experimenta una sensación de sonoridad tal como la de *B*. Pero ese excesivo estímulo es molesto e irritante para la mayoría de los escuchas, y para evitarlo se rebaja la respuesta en las altas frecuencias, mediante el control de tono de altas frecuencias, el cual presenta el inconveniente de un excesivo acortamiento de la banda de frecuencias, cuyo resultado final es el de la curva *C*. Conviene hacer notar en todo momento que las curvas de la figura 169 no son curvas convencionales de respuesta, sino curvas de sonoridad *(loudness)*, y, por consiguiente, nos permiten asegurar que, en forma predominante, el escucha prefiere una pérdida en altas frecuencias a un exceso en las medias-altas frecuencias; pero *en ningún caso es esto indicación de que las componentes del extremo de la banda de altas frecuencias no sean deseadas*. Hay buena evidencia de que la mayoría de los escuchas prefieren en programas musicales de alta calidad una gama extensa de frecuencias con una distribución espacial adecuada de las altas frecuencias y una respuesta característica relativamente uniforme.

Límite en baja frecuencia. Equilibrio en la audición. Hasta ahora nos hemos limitado al ancho total de la banda de reproducción, con el fin de establecer los límites superiores de la banda. Sin embargo, hace mucho tiempo que se ha reconocido que las frecuencias de corte de alta y baja frecuencia que limitan la gama están relacionadas, cuando se trata de reproducción de fidelidad limitada (aquella en que el espectro musical teórico completo no es reproducido), de tal modo que el escucha logre impresión satisfactoria del apropiado equilibrio de audición entre las componentes de altas y bajas frecuencias. Así, cuando el límite superior era de 5000 c/s se consideraba que la frecuencia de corte baja debía estar entre 100 y 130 c/s; para 7000 c/s, la inferior debía estar entre 70 y 90 c/s. Una relación de este tipo corresponde a un producto constante de las frecuencias de corte que, aunque antiguamente se le daba el valor de 400 000, los autores modernos lo sitúan entre 500 000 y 640 000.

No hay duda de que estos últimos valores dan completa satisfacción a una gran mayoría de escuchas y alta calidad de reproducción cuando se utilizan sistemas de alta fidelidad; sin embargo, conviene reexaminar estas ideas a la luz de un reciente trabajo de Gannett y Kerney sobre diferencias límenes de frecuencias a fin de establecer los límites más adecuados de la banda, ya que una extensión de la banda por las bajas frecuencias supone un mayor gasto y aumento de tamaño en el sistema reproductor, lo que puede no ser justificable económicamente.

Un sistema reproductor del intervalo musical de 40 a 15 000 c/s entero, es un sistema *equilibrado;* pero sabemos que en un tal sistema, un cambio en la alta frecuencia de corte de —1 lim, esto es, los 11 000 c/s, es justamente perceptible. En la práctica de las condiciones de escucha, esto es una diferencia excesivamente sutil, y es razonable admitir,

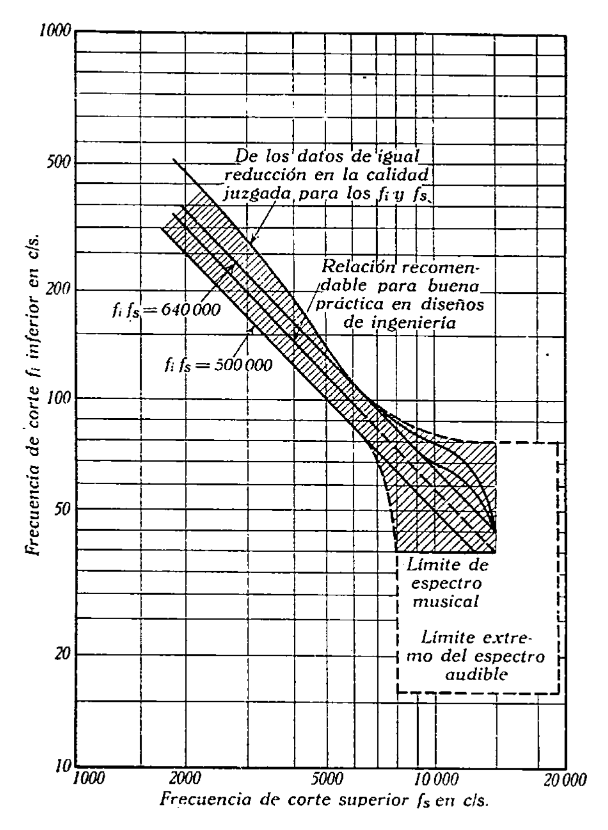


FIG. 170. Relación entre las frecuencias de corte superior e inferior para un equilibrio aural satisfactorio en la reproducción de música

y la experiencia confirma, que el cambio en el equilibrio de audición, o aural, es muy ligero y plenamente satisfactorio. A la luz de la experiencia, el equilibrio es todavía satisfactorio para una posterior reducción a —2 límenes, o sea a los 8000 c/s, y en esta base resulta que una frecuencia de 40 c/s está adecuadamente equilibrada por una frecuencia de corte superior de 8000 c/s o más. De un modo semejante, si una unidad liminal en el extremo de las bajas corresponde, según han sugerido Gannett y Kerney, a los 80 c/s, los 11 000 c/s o más serán correctamente equilibrados con los 80 c/s o menos. Estas condiciones han sido representadas en la figura 170 mediante el producto

constante, lo que conduce al equilibrio satisfactorio aural indicado por el área rayada. Ella indica que existe una considerable latitud en la elección de las frecuencias de corte, por encima de los 8000 c/s y por debajo de los 80 c/s, lo que debía esperarse, dados los realmente bajos niveles de intensidad probables, en las regiones extremas.

Otro criterio de equilibrio consiste en aparear las frecuencias de corte alta y baja por las pruebas que a juicio de escuchas, preparados para tales observaciones, produzcan igual reducción en la calidad. Una de esas curvas, sacadas de los datos de Snow, se ve en la misma figura 170, y en ella, para frecuencias superiores a los 6500 c/s, la frecuencia de corte inferior es superior a la del producto constante 640 000, si bien queda dentro del área rayada de equilibrio postulada. Debe observarse también que los datos de Snow sugieren, para bandas inferiores a los 6500 c/s, frecuencias de corte inferior, superiores a las postuladas.

Con las anteriores consideraciones en la mente, parece razonable proponer la relación de la figura 170 como una buena práctica de ingeniería; las posibles ventajas de esta relación son: *a)* proporciona una base definida para establecer los cálculos; *b)* establece una media aproximada entre los criterios extremos que pueden aplicarse, y *c)* está encaminada a una economía en los componentes de baja frecuencia. No obstante, dado que los requerimientos del equilibrio no son rígidos, existe una gran latitud en sistemas reproductores aceptables desde este punto de vista. En muchos sistemas prácticos, la respuesta cae gradualmente en los extremos de la banda, en lugar de presentar un corte brusco, y es necesario tener en cuenta la contribución de estas ramas descendentes de la característica, apareándose para la situación de equilibrio aural. En un sistema en que la frecuencia baja de corte es inadecuada por excesivamente alta, puede crearse una impresión de equilibrio, acentuando la respuesta, justamente encima del corte, esto es, muy cerca de él y encima.

Series preferidas de gamas de frecuencias para reproducción de música. De todo lo hasta ahora dicho se deduce que es posible construir una serie racional de gamas de reproducción de audiofrecuencia, con igual y estrictamente discernibles diferencias en su anchura. Ello puede hacerse reduciendo sucesivamente la frecuencia alta de corte en un limen y asignando la de corte inferior mediante la relación del equilibrio de frecuencias o aural, antes dados ([1]). Ello es de extrema utilidad para clarificar el problema de la alta fidelidad, para clasificar sistemas reproductores y focos de programas, sobre la base de un

---

([1]) Ello no es una serie de gamas que dan iguales diferencias juzgadas de calidad. La base de diferencias de un limen se ha tomado en su lugar porque los datos publicados sobre juicios de calidad son muy limitados en cuanto a su aplicación y se requiere mayor cantidad de pruebas. Sin embargo, los resultados de Snow muestran que para las bandas de interés (3 a 6), las diferencias son de igual porcentaje de calidad juzgada.

relativo mérito en cuanto a gama de frecuencias, y por último como recurso en la proposición de problemas de diseño en ingeniería que sean reales.

La tabla siguiente presenta 8 bandas de frecuencias ordenadas desde el espectro completo musical (40 a 15000 c/s) hasta lo que es probablemente el más bajo límite de utilidad para la reproducción de la música (200 a 3000 c/s). Es probable que si se desea marcadas diferencias, bajo las condiciones normales de escucha, una gama deba cambiarse por la que difiere en dos lugares, más bien que en uno.

Es evidente que el problema de la fidelidad en su conjunto es un problema relativo a las condiciones de escucha, al ancho de banda disponible para el manantial de sonido, y al coste en su relación con el valor real para el escucha. En MF y transcripciones fonográficas insuperables, hay posibilidades para una mejora substancial en el servicio. Se ha visto, sobre una base estadística, que la gama de 75 a 8000 c/s da la misma banda perceptible de frecuencias para el escucha medio y a los niveles usuales de reproducción, que la totalidad del espectro musical de 40 a 15 000 c/s. Con excepción de una pequeña diferencia en el extremo de las bajas, esta conclusión está de acuerdo con la sugerida por Fletcher de 60 a 8000 c/s, basada en un estudio que incluye no sólo la orquesta, sino muchos de los instrumentos aislados.

El término *alta fidelidad* exige gran cuidado en su uso; si ha de tener algún sentido, no debe aplicarse a gamas más estrechas que la número 3; el de *media fidelidad* parece apropiado para las 4 y 5, y en el estado actual de la técnica las bandas más estrechas deben considerarse como de baja fidelidad.

Banda núm.	Clasificación	Frecuencias de corte	
		Baja	Alta
1	Alta fidelidad	40	15 000
2	» »	65	11 000
3	» »	75	8 000
4	Media »	90	6 400
5	» »	110	5 300
6	» »	130	4 400
7	Baja »	160	3 600
8	» »	200	3 000

He aquí algunas observaciones respecto a estas bandas:

a) La banda n.° 1 se considera como el espectro musical completo. La Comisión Federal de Comunicaciones impone para la modulación en frecuencia (MF) una gama de 30 a 15000 c/s dentro de una variación de 2 dB.

b) La banda 2 produce una fidelidad tan completa como la 1, para un escucha crítico (el 5 % de mayor agudeza auditiva), en vi-

viendas muy tranquilas (el 5 % de las más tranquilas, 33 dB de nivel de ruidos), a los niveles usuales de reproducción.

c) La banda 3 produce tan completa fidelidad como la banda 1, para un escucha medio (audición media de la población), en una vivienda media (ruido medio anual, 43 dB), y a los niveles usuales de reproducción.

d) Las bandas 2 y 3 dan el máximo ancho aproximado de las transcripciones de alta calidad en disco.

e) Las bandas 5 y 6 dan aproximadamente la máxima banda útil de registros laterales comerciales en fonógrafo, y la reproducción de emisiones rurales y en la noche, de radiodifusión modulada en amplitud (MA).

f) Las bandas 2 a 6 precisan probablemente receptores de radio de tipo de consola, para la reproducción del extremo inferior.

g) El equilibrio aural se mantiene probablemente aceptable si una frecuencia de corte es apareada con la de la banda adyacente; así 65-90 a 8000; 90-130 con 5300, etc.

Potencia requerida. La reproducción de música de orquesta sinfónica en una sala amplia, a los niveles de las salas de concierto, requiere una potencia acústica media de 5 mW aproximadamente. La cresta de potencia en breves intervalos puede ser 20 dB más elevada que la potencia media, de modo que en esos momentos la potencia acústica necesaria será de 0,5 W. Si el altavoz tiene un rendimiento o eficacia del 10 %, exigirá una potencia de entrada en el mismo de 5 W. Se considera deseable mantener la capacidad de potencia del amplificador muy superior a esta cifra, con el fin de mantener muy baja la deformación.

El máximo nivel usual en viviendas suele ser unos 20 dB por debajo de los niveles en salas de concierto; ello requiere una cresta de potencia eléctrica de 5 mW y una potencia media de 0,05 mW aproximadamente. La potencia exacta necesaria depende de la eficiencia del altavoz, volumen de la sala, nivel de intensidad de reproducción y tiempo de reverberación.

Refiriéndonos al nivel de intensidad, las curvas de la figura 164 sugieren la necesidad de una capacidad de potencia relativamente uniforme, en el sistema de altavoces, para la banda entera de frecuencias. Ello es necesario con el fin de acomodarse a los máximos y altos niveles que son de casi la misma intensidad en los extremos de las altas y bajas frecuencias. Ello sugiere también que cuanto más alta es la calidad de reproducción del sistema, su capacidad de potencia debe ser suficientemente alta, para un alto nivel de reproducción, y casi la misma sobre toda la banda de frecuencia. Sin embargo, esto obliga a un coste considerablemente más alto que el que en la reproducción es permisible a bajos niveles, y, por esta razón, se utilizan capacidades de potencia en las altas frecuencias más bajas, ya que los niveles de intensidad en esta región son probablemente más bajos.

Los valores de potencias máximas obtenidos de distintos instrumentos musicales durante una ejecución intensa, están representados en la siguiente tabla:

Instrumentos	Potencia máxima en watios	Porcentaje de intervalos de 1/8 de segundo en los cuales la potencia es por lo menos 1/4 de la máxima	Banda de frecuencias que contienen los máximos
Bombo	24,6	6	250 - 500
Redoblante	11,9	2 ½	250 - 500
Platillos	9,5	7 ½	8000 - 11 300
Saxofón bajo	0,288	25	250 - 500
Bocina francesa	0,053	6	250 - 500
Flauta	0,084 0,021	½ 10	2000 - 2800
Piano	0,267	16	250 - 500
Orquesta de 75 instrumentos	13,4 66,5	9 1	250 - 500 8000 - ∞

Los instrumentos que producen mayores potencias sonoras son el bombo, que puede emitir sonidos de 25 W, el órgano, los platillos y el trombón.

La mayoría de los instrumentos, aunque no todos, son construídos de tal manera que producen mayor potencia sonora en las notas bajas, esto es, en las comprendidas entre 500 y 1000 períodos, como puede apreciarse por la tabla anterior. En ella figura también el porcentaje de los intervalos de $1/8$ de segundo, durante los cuales la potencia sonora alcanza $1/4$ de los máximos observados.

Bandas de frecuencias en la conversación. La banda entera de frecuencias de la conversación se determina por medidas físicas objetivas, en las que las presiones media y de cresta se cuentan en series de bandas que cubren el espectro completo, y por pruebas subjetivas en las que la conversación reproducida se escucha sobre un sistema reproductor de banda ancha y alta fidelidad, en el que las frecuencias de corte pueden extenderse hasta que no se observe ninguna ventaja de calidad. Una revista de la literatura sobre el asunto conduce a la conclusión de que la banda o gama de frecuencias completa para la conversación es solamente un poco menor que la precisa para la música, que abarca, según hemos visto, 40 a 15 000 c/s. Pero se sabe que una gama tan extensa no puede utilizarse con rendimiento económico en determinadas condiciones locales de escucha. Fletcher ha llegado a la conclusión de que en las condiciones medias de escucha, es suficiente una gama de 100 a 7000 c/s para obtener prácticamente una fidelidad completa en la conversación. Por otra parte, muchas veces no es la *total* o más exacta fidelidad en la reproducción el objetivo, sino la *más efectiva comunicación*, bajo las condiciones existentes, y, como veremos después, bandas más estrechas son ventajosas en este último caso.

Bandas liminales o umbrales de frecuencias. Se han determinado los cambios mínimos *perceptibles* para la música y la palabra hasta los 15 kc/s (frecuencia límite superior), habiéndose encontrado que tales cambios por encima de los 5 kc/s eran dobles para la música que para la conversación. Estas pruebas fueron hechas con una gran variedad de programas hablados, por comparación directa entre las bandas a juzgar, y como para la música, por ingenieros especializados en el juicio de la calidad de tales programas. La diferencia de umbrales (diferencia de límenes) es la diferencia en el ancho de bandas (entre las frecuencias superiores de corte), cuando el 75 % de los observadores iden-

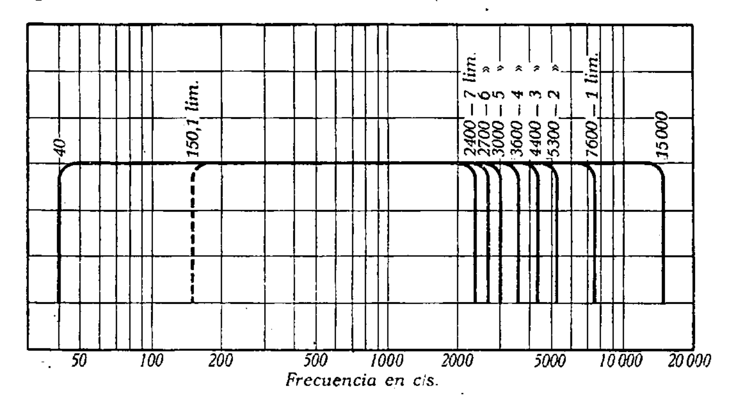


FIG. 171. Bandas de transmisión que difieren en una unidad luminal para conversación, según Gannet-Kerney, (las de baja frecuençia son hipotéticas)

tifica correctamente el ancho de las dos gamas sometidas a comparación directa. La mínima diferencia perceptible por el cambio de ancho de banda se llama unidad liminal ([1]), como ya dijimos al tratar de la música, y las frecuencias límites para una unidad liminal, para la conversación son: 15,0 - 7,6 - 5,3 - 4,4 - 3,6 - 3,0 - 2,7 y 2,4 kc/s y se ven claramente en la figura 171. La frecuencia de 150 c/s indicada por — 1 limen, es hipotética y no ha sido comprobada con pruebas sujetivas, aunque parece razonable.

La figura 172, obtenida de un trabajo de Gannett y Kerney, muestra los datos para una frecuencia de referencia, de la frecuencia límite superior que introduce un cambio de más o menos un limen, suponiendo que la transmisión por debajo alcanza a muy bajas frecuencias. Así, supongamos un sistema que transmite conversación hasta una frecuencia de 6 kc/s y deseamos reducir la banda hasta una cantidad mínima que sea la justamente perceptible. Para la frecuencia de referencia de 6 kc/s encontramos el valor de 4,6 en la curva —1 lim; pero si el sistema transmitiese hasta 4 kc/s, la misma reducción de un limen nos daría 3,4 kc/s.

([1]) De *limen; liminis*, umbral.

Para una frecuencia de referencia, las frecuencias límites superiores nos dan, para más o menos un limen, las tolerancias en frecuencias del oído a cambios en el ancho de la banda, para un sistema que transmita la conversación uniformemente hasta muy bajas frecuencias. Debe recordarse, como para la música, que estos valores fueron establecidos bajo las condiciones más favorables para la percepción en los cambios de ancho de banda; esto es, a un alto nivel de reproducción, bajo nivel de ruido, y con la posible comparación directa entre

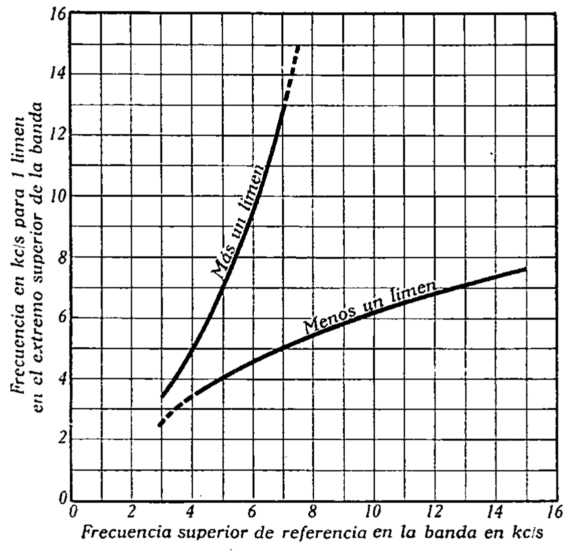


FIG. 172

las dos bandas: para condiciones menos favorables es indudable que se acusaran cambios más amplios en las frecuencias. En resumen: bajo las mejores condiciones críticas de juicio, no hay probablemente más que la posibilidad de que el escucha perciba o detecte el cambio de banda desde los 15 000 c/s hasta los 7600 c/s; o de 7600 hasta los 5300, etc. La considerable reducción en el ancho de banda del primer paso liminal, 7400 c/s, confirma el hecho de que existe muy poca energía de la conversación en dicha región. Por el contrario, cuando la frecuencia tope superior es 3000 c/s, un cambio de un limen produce una reducción en frecuencia de solamente 300 c/s, indicando que hay mucha energía de la conversación en esta región, y que es altamente importante para las características de tal conversación, tal y como aparece al oído.

Niveles del espectro en la conversación. La manera de presentar los datos relativos a la distribución de intensidad con la frecuencia, potencia, o presión en la conversación, depende de la finalidad que se

desee. Debe recordarse que la amplitud y la frecuencia en la conversación cambian continuamente y que hay pausas entre sílabas, palabras y sentencias o frases; más aún: hay diferencias características entre la voz del hombre y de la mujer, y las variaciones individuales dentro de cada tipo son considerables. En tales condiciones, el problema no puede abordarse más que estadísticamente. El equipo utilizado para tal finalidad consta, brevemente descrito, de micrófono, amplificadores adecuados y equipo analizador y de recuento. Este último,

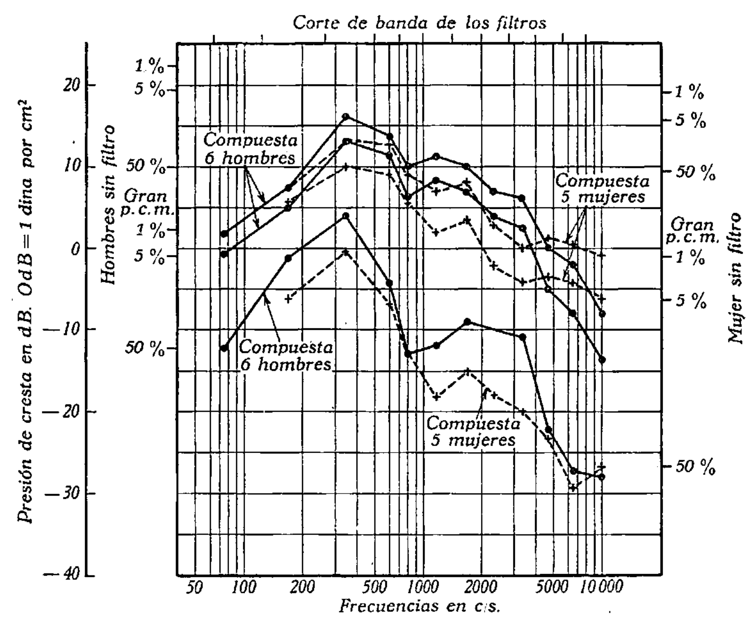


FIG. 173. Presiones de cresta en bandas de frecuencias de conversación. Los % son la proporción de los intervalos en que las presiones indicadas son superadas

destinado a la determinación de los valores de cresta, consta de una serie de tubos de descarga luminescente, capaces de encenderse a determinados niveles, que cubren la gama de niveles de interés. En el momento que un determinado tubo se ilumina, un contador conectado a su salida, registra el hecho. Una particular presión de cresta en la conversación origina un voltaje de cresta en el analizador, y todos los tubos que tengan potenciales de descarga iguales o menores a aquel voltaje de cresta de la conversación se iluminan y su correspondiente contador avanza un número. El proceso se repite alternativamente en intervalos de $^1/_8$ y $^1/_4$ de segundo, y al final puede computarse la distribución de crestas de las lecturas de los contadores. El análisis se efectúa primero con la conversación sin filtrar, y después con ésta filtrada mediante la ayuda de filtros de paso de bandas de frecuencias seleccionadas.

La figura 173, tomada de un trabajo de Dunn y White, da los valores de la presión de cresta para conversación, obtenidos de un gran número de recuentos (muestras) tomados en intervalos de $^1/_8$ de segundo, para 6 hombres y 5 mujeres, y uniendo los niveles de presión observados en las bandas de los filtros individuales, para los porcentajes de tiempo indicados.

Los valores del 1 % (que son excedidos solamente el 1 % del tiempo) pueden tomarse como las crestas máximas de significación práctica, mientras que los valores del 50 % representan las crestas más probables, y se observa que los valores de cresta más grandes se encuentran en la banda de 250 a 500 c/s. Podría esperarse que los valores de cresta en la gama total sin filtrar fueran más grandes que los obtenidos en las bandas parciales, y así es, en efecto, debido a que las crestas en dos o más bandas parciales se encuentran en fase y se suman.

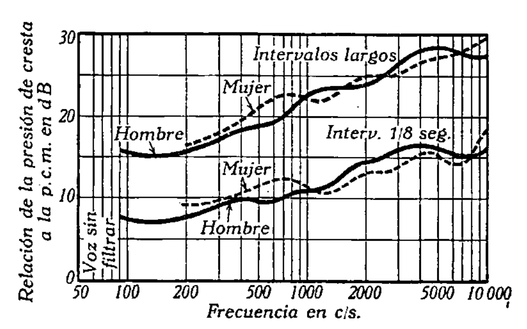


FIG. 174. Factor de cresta para la voz en diferentes regiones de la banda y en largos y cortos intervalos

Los valores de cresta no pueden interpretarse directamente dentro de los fenómenos de audición, pero son muy útiles para determinar los puntos de sobrecarga de los elementos electroacústicos y amplificadores.

Datos similares podrían obtenerse a partir de la *presión cuadrática media* (p. c. m.) que da una indicación de la *energía* de la conversación. No obstante, una información equivalente puede deducirse de la figura 174 que representa el *factor de cresta* o relación de la presión de cresta a la presión cuadrática media, en conjunción con las presiones de cresta de la figura 173. Se notará que para grandes intervalos de tiempo, el factor de cresta, para voz sin filtrar, es para hombre y mujer de 20 dB, mientras que para pequeños intervalos es sólo de 10 dB aproximadamente; lo que tiene aplicación inmediata en la sobrecarga de un amplificador.

Supóngase un amplificador tarado para 15 W con onda sinusoidal, y que la potencia instantánea de cresta con onda sinusoidal a plena potencia sea 30 W, lo que equivale a decir que esta potencia máxima no puede probablemente sobrepasarse con una onda sinusoidal sin incurrir en una excesiva deformación. Supongamos ahora que el amplificador trabaja con ondas de conversación, de modo que para la máxima presión de cresta de ésta resulte una potencia instantánea de cresta de 30 W, la potencia media será sobrepasada por la potencia máxima de cresta instantánea en una cantidad igual al factor de cresta. Para un intervalo de $^1/_8$ de segundo, el factor de cresta es de 10 dB,

lo que indica una potencia media de $^1/_{10}$ de la potencia máxima, o sea 3 W, mientras que en grandes intervalos de tiempo, incluyendo pausas entre sonidos, palabras y sentencias, ese factor se eleva a 20 dB y la potencia de cresta en grandes intervalos será, por consiguiente, sólo de 0,3 W; en suma, si se utiliza el amplificador tarado a 15 W, con excitación de conversación tal que su potencia máxima instantánea sea de 30 W (la potencia tarada instantánea para una onda de entrada sinusoidal), los sonidos individuales de la conversación son capaces de producir potencias de unos 3 W; pero la potencia media sobre un corto período de tiempo será solamente de 0,3 W. Esto no indica que deba ser empleado un amplificador tarado para potencia más baja, ya que es necesario evitar la deformación por armónicos e intermodulación (lo que hemos llamado deformación en amplitud), pero esa relativamente baja potencia media puede ser tomada en cuenta ventajosamente para el diseño de controles de volumen de altavoces, líneas de atenuación y otros componentes que se encuentran acotados por una temperatura límite tolerable.

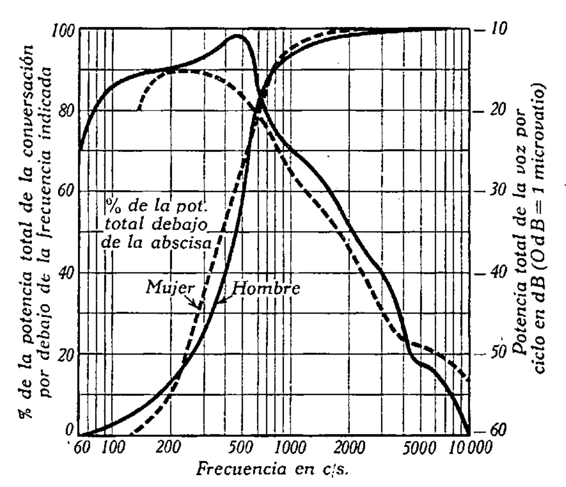


FIG. 175. Potencia total y espectro de potencias para la voz

Si se desea obtener la distribución de la energía o potencia de la voz con la frecuencia, puede hacerse midiendo las presiones cuadráticas medias en las diversas bandas de frecuencias y calculando su valor por ciclo. Tal resultado se encuentra en la figura 175, de Dunn y White, en la que se ha indicado, además, la potencia que existe por debajo de una frecuencia determinada, expresada en tanto por ciento de la potencia total de todo el espectro; se observa que el 95 % de la potencia se encuentra por debajo de los 1000 c/s y que casi el 65 % se reparte por debajo de los 500 c/s. Es importante considerar la distribución de la potencia de la conversación con la frecuencia, porque permite conocer la influencia de la anchura de banda sobre la *articulación*, lo que no es otra cosa que la medida de la *inteligibilidad*.

Niveles de intensidad en bandas críticas de frecuencias. Todos los datos anteriores se refieren a aspectos puramente físicos del estudio estadístico de la presión y potencia acústica, y aunque sean útiles para

varias finalidades, no dan información directa de la forma de evaluar el oído los sonidos de la voz. Un estudio extensivo de los procesos de audición, realizados por Fletcher y su escuela, ha llevado a la conclusión de que el oído integra los sonidos variables de la conversación sobre un intervalo de $^1/_4$ de segundo, y qué la energía sonora integrada en una bánda crítica de frecuencias, sobre este período de tiempo, suena fisiológicamente tan fuerte (o como nosotros lo hemos designado,

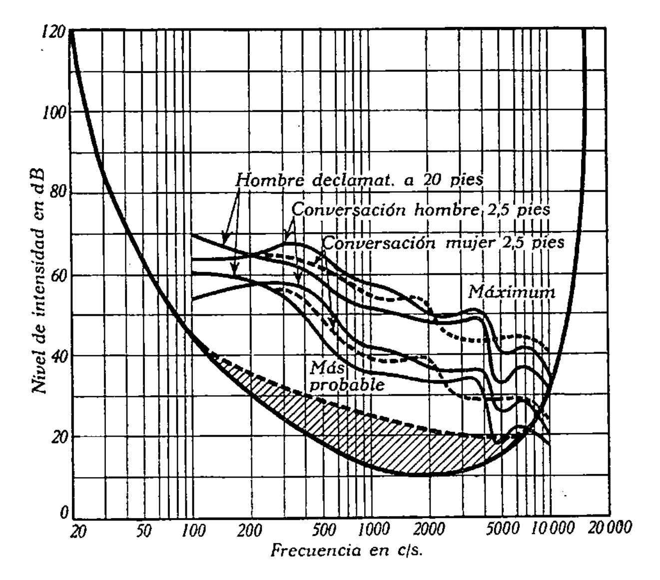


FIG. 176. Niveles de intensidad en intervalos de $^1/_4$ de segundo y las bandas críticas de frecuencias para conversaciones típicas

es tan sonoro), como un tono puro de la misma banda de frecuencia que produzca la misma energía sonora en cada intervalo de $^1/_4$ de segundo. En virtud de ello, se podrán expresar los niveles de intensidad de la conversación sobre la misma base que los contornos de audición de que hemos hablado al tratar de la música, los cuales son contornos de audición umbrales de tonos puros, investigar el enmascaramiento debido al ruido, y computar la sonoridad en condiciones variables.

Fletcher ha dado los niveles máximos de intensidad en bandas de frecuencias críticas, para voces de conversación y de declamación, y para hombre y mujer; para las distancias citadas se muestran en la figura 176, donde se indica también los contornos medios de audición, cuando no existen ruidos, esto es, para una población o gente media, tal como señalamos al tratar de la música. También se han representado los correspondientes niveles de intensidad más probables, o que son sobrepasados el 50 % del tiempo, porque se les considera, razonablemente, como el nivel *promedio* más representativo, bajo las con-

diciones supuestas; como se observa en la figura 176, este último se encuentra de 7 a 16 dB por debajo de los niveles máximos. La parte rayada de la figura representa, como siempre, la pérdida de audición producida por enmascaramiento, debido a un nivel de ruidos de un ambiente medio, de 43 dB. Como en el caso de la música, los niveles que están por debajo del contorno umbral de audición son inaudibles al escucha medio, y también lo son aquellos cuya intensidad cae en la parte rayada debida al enmascaramiento. Se ve que el contorno umbral de audición y el área de enmascaramiento limitan la gama de frecuencias perceptibles por su parte superior, para los niveles de conversación y distancias supuestas, y que si se rebaja el nivel de conversación el efecto es desplazar hacia abajo las correspondientes curvas, aumentando la limitación en las altas frecuencias.

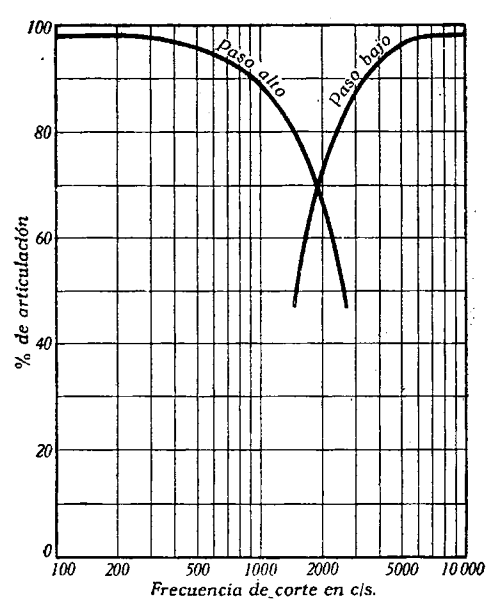


FIG. 177. Articulación silabeada con limitación en la banda baja (todas las f debajo la abscisa) y en la alta (toda f encima la abscisa)

De la inspección de las curvas de nivel de intensidad en dicha figura se deduce que pueden sustituirse con cierta aproximación por rectas, especialmente en la muy importante banda por encima de los 300 c/s. Las pendientes de estas líneas son casi las mismas, e indican que el nivel de intensidad desciende por término medio de 5,3 a 6,5 dB por octava cuando crece la frecuencia. Como veremos después, esta característica descendente crea un problema, cuando es necesario reproducir una conversación inteligible en presencia de niveles de ruido elevados.

Articulación. Una de las más significativas y quizá la más importante medida de la inteligibilidad es la *articulación silabeada*, o simplemente articulación. Para probar un sistema se dispone una persona que recita una lista de sílabas que comprende los sonidos fundamentales de la conversación, aunque sin sentido; el escucha escribe cada sonido como él lo oye, y el número de sílabas correctamente identificado, expresado en tanto por ciento nos da la articulación silabeada. Cualquier tipo de deformación del sistema tiende a reducir la articulación e interesa de momento conocer cómo influye sobre ella la banda de frecuencias.

La figura 177 muestra la forma según la cual la articulación se encuentra gobernada por la limitación de la banda en sus extremos superior e inferior; para la curva marcada *paso alto* se transmiten todas las frecuencias por encima de la abscisa correspondiente a cada frecuencia, mientras que para la curva marcada *paso bajo* se transmiten todas las frecuencias por debajo de cada abscisa. Se ve que la articulación no es apenas afectada cuando la frecuencia de corte inferior se eleva a los 400 ó 500 c/s, y lo mismo sucede si la de corte superior se reduce a 5000 ó 6000 c/s. Por último, la articulación se reduce al 70 % cuando son transmitidas todas las frecuencias *por encima* o *por debajo* de los 1000 c/s.

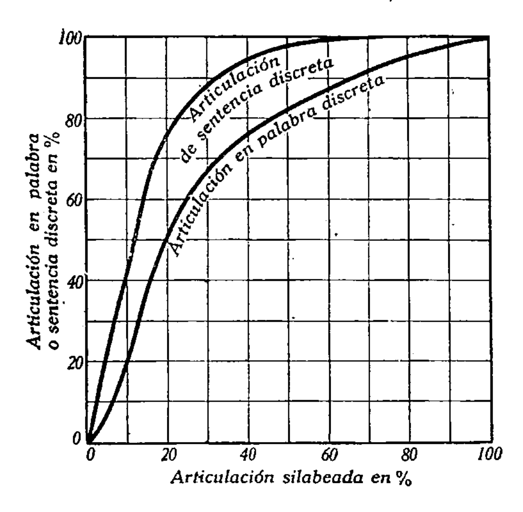


FIG. 178. Articulación silabeada en %. Correlación entre articulación silabeada y de palabra y sentencia discretas

Una correlación entre la articulación de palabra discreta o articulación de sentencias discretas y la articulación silabeada se muestra en la figura 178. Aunque algunos de los sonidos que forman una palabra no puedan ser individualmente reconocidos, la asociación de estos grupos de sonidos permite su reconocimiento completo; es por esta razón que la articulación de palabras discretas es mucho más alta que la articulación silabeada, particularmente a bajos porcentajes de esta última. Igualmente la inteligencia es capaz de reconocer el completo significado de una sentencia, aunque alguna de sus palabras no sea reconocida, por cuya razón la articulación de una sentencia discreta es más alta que la de la palabra; así, para una articulación silabeada del 30 % encontramos una articulación de la palabra del 65 % y una de la frase o sentencia del 87 %.

Bandas de comunicación. Es de gran interés conocer los datos sobre la articulación, a medida que se reduce el ancho de banda, simultáneamente en ambos extremos, y una serie de estudios realizados muestran que para bandas de paso intermedias, la articulación es probablemente el producto de las articulaciones separadas, para las condiciones de paso alto y paso bajo, con pequeñas reducciones en la articulación y, desde luego, se anula con la anulación del ancho de banda. La forma según la cual la articulación decrece con el ancho de banda es muy incierta, pero de las curvas de articulación se desprende que depende de la posición de la banda en la gama total de

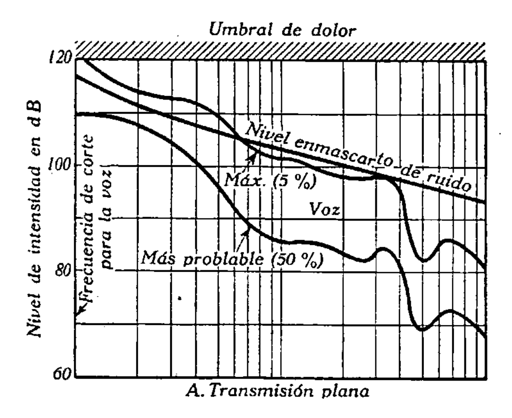
frecuencias. Presumiblemente, los mejores resultados, desde el punto de vista de la articulación, se obtienen centrando la banda en las proximidades de los 2000 c/s, y la experiencia demuestra que la conversación puede transmitirse todavía con utilidad en esta región con un ancho de banda de 1000 c/s, si bien la articulación será inadecuada para algunos fines, por ser la conversación penetrante y poco agradable. Cuando la banda se ensancha, el sistema puede tener mejor cualidad, pero la banda debe colocarse propiamente en la escala de frecuencias. Por ejemplo: el oído aprecia que un sistema con una banda de 3 kc/s situada entre 200 y 3200 c/s (representativo de un sistema telefónico) posee una calidad perfectamente buena, mientras que otro con 3 kc/s también, pero entre 1000 y 4000 c/s está probablemente fuera de los límites aceptables, aun para fines especiales de comunicación, debido a una reproducción excesivamente tenue y de alto tono, aun cuando la articulación sea muy buena.

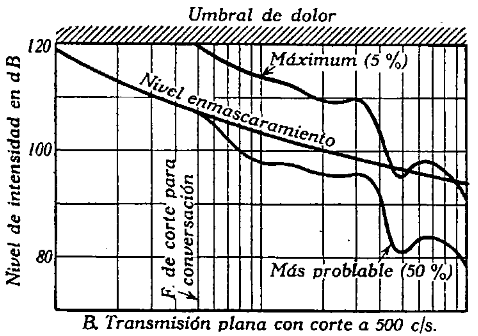
Incidentalmente diremos que los factores puramente acústicos que intervienen en la elección de la banda de frecuencias para comunicaciones son: *a)* el coeficiente asignado a su naturalidad en cuanto a calidad; *b)* el carácter y nivel de los ruidos, y *c)* la articulación. Las limitaciones físicas en el equipo reproductor y amplificador constituyen otro aspecto de la cuestión; como hemos visto de las potencias de cresta y espectros de potencias (figs. 173 y 175), la potencia del amplificador necesaria se reduce rápidamente cuando se eleva la frecuencia de corte inferior; más aún: los altavoces, a igualdad de otras cosas, son menos voluminosos, si no se requiere reproducir frecuencias muy bajas.

Hay otras razones técnicas que abogan por el uso de relativamente elevadas bajas frecuencias de corte, desde el punto de vista de diseño de altavoces, especialmente cuando se trata de trabajar con niveles elevados de reproducción, y la dureza en las condiciones de trabajo, es una calidad esencial.

Sistemas para música y conversación. Cuando se debe reproducir música y conversación, como en el caso del cine, el sistema debe diseñarse para obtener los mejores resultados en la una y la otra, o bien puede adoptarse un compromiso entre ambas.

Una gama de frecuencias adecuada para la música nos dará una buena calidad y articulación para la conversación, a niveles medios o bajos de ruido, siempre que no se precisen altos niveles de reproducción. Cuando el nivel de ruido se hace alto, como sucede en localizaciones industriales, el enmascaramiento tiende a reducir la banda de frecuencias perceptibles en la música, según ya hemos visto, y limita el rendimiento en la conversación, a menos que se utilicen excesivamente altos niveles de reproducción; de aquí que en sistemas diseñados para medios y altos niveles de ruido, se atienda a una *buena* reproducción de la conversación y una reproducción *limpia* de la música.





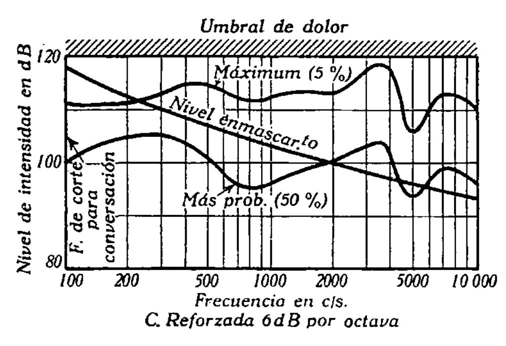


Fig. 179. Efecto de la característica de transmisión en el enmascaramiento de voz declamatoria por el ruido

Reproducción de la conversación con altos niveles de ruido. Los niveles de intensidad del orden de los 120 dB se consideran como en el *contorno o umbral del dolor*, y por ésta razón los máximos niveles de intensidad, en bandas críticas de frecuencias para la conversación, no deben exceder a ese valor.

A menudo se encuentran niveles de ruido de origen industrial tan elevados que dan lugar a niveles de enmascaramiento muy próximos al umbral de dolor. El problema de reproducir voz inteligible bajo tales circunstancias, puede analizarse refiriéndonos a la figura 179 *A*. La curva marcada *nivel de enmascaramiento* se obtiene asignando una distribución espectral típica a un ruido capaz de producir una lectura en un medidor de nivel sonoro de 115 dB y calculando el nivel de enmascaramiento para aquellos espectros típicos (1).

La curva de máximo nivel de intensidad para conversación declamatoria se ha desplazado hacia arriba hasta que su nivel máximo alcance los 120 dB, lo cual se efectúa para 100 c/s. Se observa que la curva de niveles máximos se encuentra por debajo del nivel de enmascaramiento, excepto para la parte de la banda entre 100 y 600 c/s, y, bajo tales con-

(1) La lectura de 115 dB se obtendrá de un medidor de nivel, con red compensadora a 40 dB. Este sistema de medida es utilizado por Hoth para identificar el espectro absoluto de niveles. Véase *The Noise Premier* de la General Radio Company.

diciones, la conversación será substancialmente enmascarada. Si cortásemos las bajas frecuencias a los 500 c/s, como se indica en la figura 179 *B*, los niveles de intensidad encima de esa frecuencia podrían ser elevados en 11 dB, que es el máximo nivel por encima del nivel de ruido, aunque el nivel más probable (superado el 50 % del tiempo) se encuentra enmascarado o cubierto en 2 ó 3 dB en una parte impor-

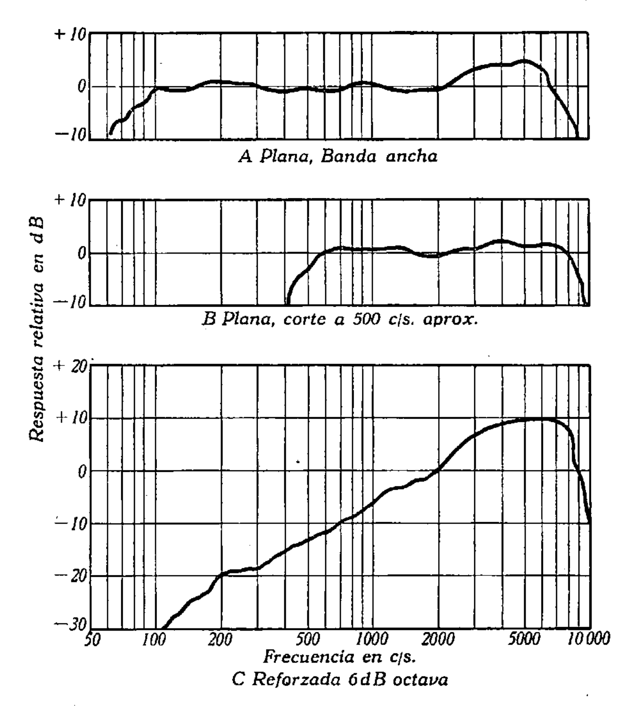


FIG. 180. Característica típica total aire a aire, para sistemas de reproducción de voz (incluyendo micro, amplificador y altavoz)

tante de la banda de frecuencias. Esto significa que el nivel de intensidad cuadrática media será superado por el nivel de enmascaramiento algo menos que la mitad del tiempo; la experiencia demuestra que un sistema de transmisión de tal naturaleza se muestra útil y goza de una buena articulación.

Por último, existe una tercera posibilidad, que se ha mostrado eficaz cuando existen los máximos niveles de ruido, o cuando desea obtener la máxima eficiencia en sonoridad. Según hemos apuntado previamente, los niveles cuadráticos medios de intensidad en bandas críticas de frecuencias tienen una pendiente hacia abajo a medida que crece la frecuencia, de 6 dB por octava aproximadamente. Si la característica de transmisión de aire a aire (es decir, de la presión sonora en el micrófono a la presión sonora en la posición de escucha) se hace inversa y con la pendiente hacia arriba en 6 dB por octava, es evidente

que los niveles reproducidos en bandas críticas de frecuencias serán constantes por término medio al variar la frecuencia.

El resultado será que podremos elevar los niveles de intensidad en la región por encima de los 1500 c/s a niveles más altos que los de la figura 179 *B*, tal como se ve en la figura 179 *C*, sin penetrar en la línea de dolor, y puesto que esa región de la banda de frecuencias contribuye de un modo importante en la articulación y sonoridad, lograremos así una reproducción muy eficaz. Características típicas de sistemas se ven ilustrados, con las aproximaciones comerciales, en la figura 180, donde se da la característica total de transmisión de aire a aire, tal y como la hemos discutido anteriormente. En la figura 180 *A* se da la de un sistema para la reproducción de alta calidad de la conversación con una banda relativamente ancha y una respuesta plana o uniforme para todas las frecuencias. La figura 180 *B* es la de un sistema con transmisión plana, pero con una frecuencia de corte inferior, a 500 c/s. Por último, la figura 180 *C* es la de un sistema reforzado o favorecido, en que la transmisión tiene una pendiente hacia arriba de 6 dB por octava.

Podrá pensar el lector que podría obtenerse una igualación más efectiva de los niveles de intensidad elevando éstos sin llegar a la línea de dolor, pero debe tenerse en cuenta que la tal línea no está determinada con absoluta certeza y varía de un individuo a otro. Altavoces y sistemas que satisfacen a los anteriores principios han sido diseñados recientemente con finalidades militares, para ser efectivos sobre navíos de guerra en las condiciones de alto nivel de ruido que prevalecen en un combate.

Capacidad del amplificador. Aun cuando se puede ver que elevando la frecuencia de corte inferior o favoreciendo la pendiente de la respuesta a razón de 6 dB por octava se reduce la potencia acústica y eléctrica en la conversación y se aumenta la eficiencia en sonoridad con relación a un sistema de respuesta plana, se precisa saber lo que esa reducción significa como capacidad del amplificador.

En primer lugar, debemos observar que hasta ahora nos hemos limitado a la potencia acústica en la conversación y que la respuesta característica es la total o de aire a aire. La traducción de la conversación, que eléctricamente actúa sobre las rejillas del paso de salida, debe ser una copia exacta de la presión acústica en el micrófono, y, por consiguiente, el paso de salida debe ser capaz de no sobrecargarse con toda la banda de los valores de cresta, cualquiera que sea la modificación de la respuesta en las componentes posteriores del sistema (redes de salida, altavoces, etc). En la hipótesis de que no se tolere deformación en frecuencia, la economía en el paso de salida es equivalente a decir que la excitación de rejilla para la que dicho paso está preparado debe reducirse en la medida que se quiere aumentar aquéllas. Recíprocamente y para un amplificador dado, se aumenta la potencia efectiva del mismo para la conversación en la medida que los voltajes

de cresta son reducidos (el uso de dispositivos limitadores de crestas es otro medio de conseguir esto).

Refiriéndonos a la figura 174, se ve que las crestas máximas para conversación de hombre se encuentran entre 250 y 500 c/s. Si ahora intercalamos algo entre el sonido original y las rejillas del paso de salida de modo que la característica de transmisión sea con pendiente elevada de 6 dB por octava y la ganancia se ajusta de modo que sea la misma a los 2000 c/s, entonces el máximo voltaje de cresta quedará reducido en 4,5 dB aproximadamente, y ello se realizará en la región de los 3000 a 4000 c/s.

Comparada con la característica plana, la capacidad del amplificador podrá reducirse (y el coste) hasta uno capaz de manejar justamente la excitación reducida de la rejilla. Pero, y ello es quizá de mayor importancia práctica, la inserción de una red de característica favorecida delante de las rejillas del paso de salida, hace posible elevar el nivel de intensidad acústico en 4,5 dB a los 2000 c/s, sin sobrecarga del amplificador.

Debe recordarse que los 6 dB por octava dan prácticamente niveles uniformes de intensidad en bandas críticas de frecuencias sobre toda la gama entera. Asumiendo la máxima excitación de rejilla, en ambos casos hay, pues, una ventaja de 4,5 dB para un amplificador dado, cuando la característica reforzada o favorecida se introduce delante en lugar de detrás del paso final; ello es equivalente a una relación de potencias de 2,8 a 1.

Teóricamente, si nuestros datos de los valores de cresta fueran verdaderamente representativos de un conversador medio, podría verse que una pendiente de 3 dB por octava delante del paso de salida, nos daría una ventaja de 7 dB; sin embargo, la incerteza en la magnitud y localización de la banda de las frecuencias de las crestas para los conversadores individuales, y la imposibilidad de obtener una respuesta absolutamente lineal desde el micrófono hasta el paso de salida, hace dudoso que tal ventaja pueda realizarse en la práctica.

Puede observarse de la inspección de la figura 174, que la frecuencia de corte inferior de un sistema plano debe situarse en la proximidad de los 700 c/s para obtener la misma reducción del nivel de cresta. Esto se indica meramente para comparación, porque puede haber otras razones que hagan deseable colocarla en otra posición.

Consideraciones prácticas. ¿Cómo pueden obtenerse económicamente la pendiente favorecida y la frecuencia inferior de corte? Ciertos tipos de micrófonos, particularmente la variedad de cristal, pueden obtenerse con pendientes del valor adecuado; pero esa pendiente puede obtenerse también mediante el uso de una red correctora entre un micro cualquiera y la entrada del amplificador; en fin, la característica favorecida puede ser típica del altavoz.

En cuanto a la frecuencia de corte, se facilita con un filtro de paso alto, pero tal filtro debe intercalarse con un sistema plano de

entrada en cuanto a su respuesta, si el altavoz está diseñado para trabajar en la banda de alta frecuencia solamente.

Series de bandas preferidas para la conversación. Es conveniente disponer de una serie de bandas de audiofrecuencia cuyas diferencias de ancho sean las justamente perceptibles al oído, de un modo análogo a como lo hicimos para la música. La tabla siguiente representa bandas cuya frecuencia de corte superior difiere en una unidad liminal y cuya frecuencia de corte inferior viene determinada por la condición de equilibrio aural de la audición, ya dada para la música. La transmisión plana entre las frecuencias de corte proporciona sonidos equilibrados al oído ni *tonales altos* ni profundos *(boomy)*. La calidad más alta se obtiene para la banda 1 y decrece en aproximadamente pasos perceptibles, en las bandas sucesivas.

Una serie de bandas preferibles de audiofrecuencia para la reproducción de la conversación

Banda número	Frecuencia corte		Articulación		
	Baja	Alta	Sílaba	Palabra	Sentencia
1	40	15,000	98	99,7	100
2	80	7,600	98	99,7	100
3	110	5,300	97,5	99,5	100
4	130	4,400	96	99	100
5	160	3,600	93	98,5	100
6	200	3,000	88	97,5	100
7	220	2,700	85	96,5	100
8	250	2,400	80	95	100

Nota I. El equilibrio aural será probablemente satisfactorio si una frecuencia de corte inferior se reemplaza por la de la banda adyacente.

Nota II. Aun cuando una gran mayoría de las consideraciones relativas a la palabra tienen interés primordial en los sistemas de comunicación destinados a reproducir *exclusivamente* la conversación, su utilidad en el caso de los equipos de reproducción de cine es manifiesta, ya que nos ayudan a percibir bajo qué condiciones la inteligibilidad será clara y la voz natural y de aquí que nos hayamos ocupado de ellas.

XI. La película

Es imposible, y de interés secundario, hacer aquí un estudio detallado de la película, que nos llevaría al desarrollo de la forma de efectuarse el registro de sonido y la teoría de la fotografía, por lo que sólo nos vamos a limitar al estudio de todas aquellas cuestiones que tienen una relación directa con la proyección en las mejores condiciones de la misma, y en los modernos sistemas de proyección sonora.

Tipos de película

Existen en la actualidad tres tipos de película en el mercado, que se clasifican por su ancho, si bien la más estrecha no tiene aplicación al espectáculo y sólo se utiliza en proyectores de juguete: la normal o standard de 35 mm de ancho, la de 16 mm, subnormal o substandard, que en América se extiende cada vez más, utilizándose ya en el año 1937 en algunos locales hasta con 600 espectadores, y en grandes empresas industriales para la propaganda e investigaciones de sus producciones, y con fines educativos; por último, la de 8 mm de anchura; de ellas, las dos primeras llevan registro de sonido (la de 16 mm no siempre).

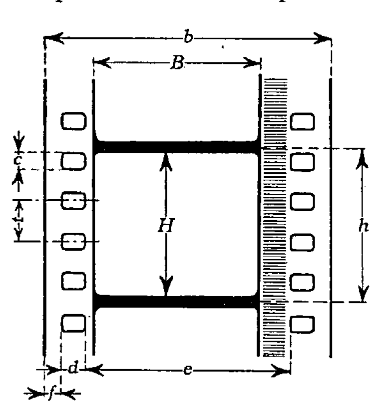


FIG. 181

NORMAS DIN

t = 4,75 ± 00,1
b = 34,9 ± 0,1 mm
c = 1,9 ± 0,01 mm
d = 2,8 ± 0,01
e = 28,2 ± 0,01
f = 3'35 ± 0,01 mm
H = Alto de una imagen 18 mm en el nuevo tamaño película americana H = 15,75.
h = distancia ejes de negro entre dos cuadros = 19 mm
B = 24 en película muda y 21,3 en la nueva película americana

Dimensiones de la película normal. Sus dimensiones físicas, así como la forma y posición del registro sonoro y de las aperturas de la cámara tomavistas y del proyector, se han normalizado bajo la dirección de la Academia de Ciencias y Artes de Cine sonoro de América;

y en Europa se han dado las normas DIN, equivalentes a las anteriores, figura 181. Las primeras aparecen en la figura 182, correspondientes a J.S.M.P.E. de noviembre de 1934, y en ella se ve fácilmente que las di-

PELÍCULA STANDARD DE 35 mm CON SONIDO
Estas dimensiones y localizaciones son relativas a película sin contracción.
Positiva, emulsión hacia delante. Negativa, emulsión detrás.

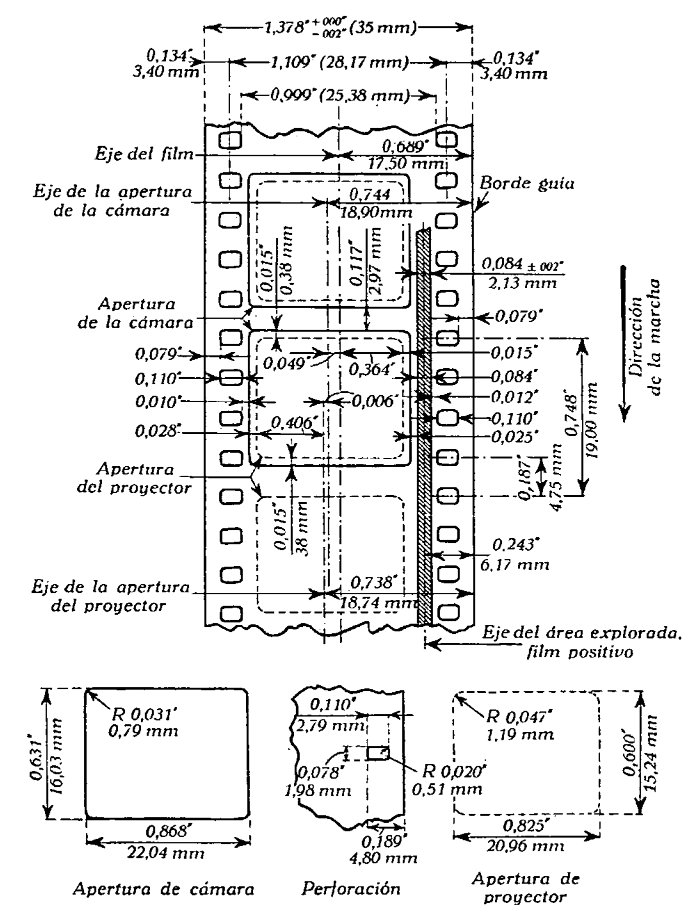


FIG. 182. En la cámara tomavistas, el lado de la emulsión de la película está en frente del objetivo. Vista desde el objetivo, la banda del sonido está a la izquierda. En el aparato de proyección, el lado de la emulsión de la película está frente al foco luminoso. Vista desde el foco luminoso, la banda de sonido está a la derecha

mensiones dela apertura de la cámara tomavistas son mayores que las de la apertura del proyector. Con frecuencia, estas dimensiones no se conservan debido a que la película se reseca por falta de humedad suficiente y, consecuentemente, se contrae, lo que lleva aparejado el que o bien

no pasa en condiciones adecuadas por el sistema de progresión en el proyector, o bien, muchas veces, por no conservarse las distancias relativas a los taladros de la perforación, se desgarran éstos en los

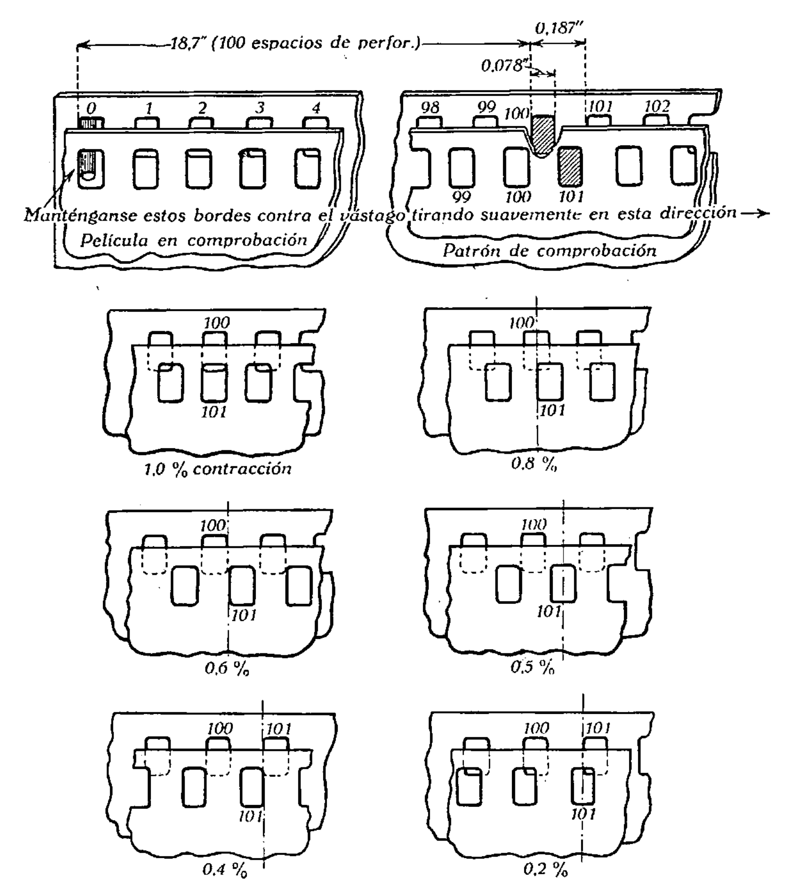


FIG. 183. La cinta metálica está siempre debajo.

dientes de los rodillos de arrastre y al cabo de poco tiempo la película está inutilizada; una buena práctica es mantener las películas en un ambiente húmedo o bien colocar alcanfor en las cajas de películas.

La tabla de la página siguiente da las alteraciones de las características normales de la película por contracción de la misma referidas a la figura 181.

La casa Zeiss-Ikon ha construído un calibrador formado por una pequeña regleta de metal, mediante la cual y unas señales que lleva se puede conocer el grado de contracción de la película; pero es mucho mejor emplear cintas de metal perforadas en la misma forma que la

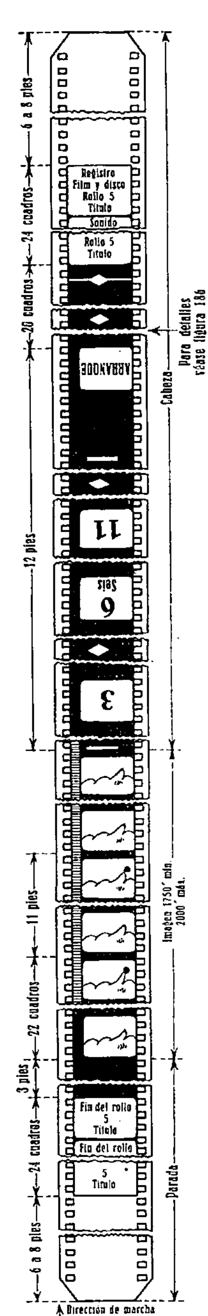


FIG. 184

Contracción de la película en %	Distancia entre las perforaciones		Anchura de la película	
	en 10 cuadros = 40 × *t* en mm	en 20 cuadros = 80 × *t* en mm	*b* en mm	*e* en mm
0	190,0	380,0	34,90	28,20
0,2	189,6	379,2	34,83	28,14
0,4	189,2	378,5	34,76	28,09
0,6	188,9	377,7	34,69	28,03
0,8	188,5	377,0	34,62	27,97
1,0	188,1	376,2	34,55	27,92
1,2	187,7	375,4	34,48	27,86
1,4	187,3	374,7	34,41	27,81
1,6	187,0	373,9	34,34	27,75
1,8	186,6	373,2	34,27	27,69
2,0	186,2	372,4	34,20	27,64

La contracción sólo es tolerable hasta el 1,4 %.

película, las cuales, según se indica en la figura 183, permiten determinar más exactamente el grado de contracción de la misma; estas cintas metálicas sirven también para examinar el ajuste en el sistema de progresión de la película en el crono y cabeza de sonido.

Especificaciones sobre colas terminales de los rollos de película. No sólo se han dado normas sobre las dimensiones de la película, sino que se han dado especificaciones sobre las llamadas *colas* o *cabezas* terminales de los distintos rollos que suelen formar el conjunto de una película; estos rollos suelen ser de unos 600 m de longitud (2000 pies), y dichas colas sirven para proteger e identificar la película y sus partes, así como para facilitar la correcta proyección de la misma, tanto en lo que se refiere a los cambios entre las dos máquinas que efectúan la proyección como para la más correcta posición del *fader* o atenuador que regula el volumen en la sala de espectáculos, teniendo en cuenta el sistema de registro que en tal película se ha efectuado.

La figura 184 muestra dicha especificación para cualquier rollo, tal como se ha normalizado a partir del año 1936 en América, y cuyo detalle es el siguiente:

a) Cabeza protectora. Deberá ser transparente, de materia prima sin impresionar; su longitud puede oscilar entre 1,80 m y 2,50 m (6 y 8 pies), y cuando por razón del uso se reduzca a la dimensión más pequeña, deben restablecerse los 2,50 m.

b) Cabeza de identificación. (Título de la película y parte.) Se compondrá de 24 cuadros, en cada uno de los cuales se imprimirá en letras negras sobre fondo blando: *a)* el tipo de registro, *b)* el número del rollo (números árabes no menores de $^1/_4$ de la altura del cuadro), y *c)* el título de la película.

c) Cabeza de sincronización. (Tiene su aplicación principal en el caso hoy poco corriente de películas sincronizadas con disco, y también con los modernos sistemas de registro para dar las indicaciones de la posición del fader según el volumen requerido sobre el normal, en la sala de proyección.) Constará de 20 cuadros delante del correspondiente a la marca *Start (partida o Arranque)*, seguidos de 3,66 m (12 pies), incluyendo la marca *Arranque* hasta la imagen de película, todo opaco, excepto como se indica a continuación: En el centro del primer cuadro deberá haber una línea blanca horizontal que atraviese la imagen y banda de sonido, de un ancho de 0,8 mm (1/32″), con un rombo en su centro superpuesto de 3,2 mm (1/8″) de altura. Los 15 cuadros siguientes (fig. 186) pueden emplearse para estudio sensitométrico, indicación del tipo de registro o indicación del nivel sonoro, o, en fin, cualquier otra indicación; si no se usa para estos fines deberán ser opacos.

La marca *Start (Arranque)* deberá cubrir el cuadro 21 en letras negras invertidas sobre fondo blanco. La altura standard de la apertura de la cámara tomavistas 16,06 mm deberá emplearse para la fotografía de este cuadro, así como de todos los que le siguen hasta el comienzo propiamente dicho de la película con imagen. Desde la marca Arranque hasta la imagen, la cola deberá tener líneas de separación de cuadros que no alcancen el área de sonido.

En los cuadros con los numerales 6 y 9, deberán imprimirse las palabras seis *(six)* y nueve *(nine)*, también invertidas, debajo del número, para eliminar la posibilidad de error en las cabinas, debido a la semejanza entre ambos números.

Comenzando a los 3 pies (90,5 cm) del primer cuadro de imagen de la película, cada 30,5 cm (1 pie) deberá marcarse por un cuadro transparente con un número invertido negro de, al menos, la mitad de la altura del cuadro. Estos números indicadores de metraje serán los consecutivos de 3 a 11 inclusive. En cada punto distante exactamente 20 cuadros delante de cada cuadro, correspondiente a uno de esos números, deberá haber un rombo (blanco en fondo negro) de 1/8″ (3,2 mm) de altura por 3/8″ (9,5 mm) de anchura.

d) Imagen. Se recomienda que la acción en la imagen comience y acabe en cuanto sea posible con desvanecimiento, pues de lo contrario, se precisará mantener un sonido de volumen apreciable a 1,50 m (5 pies), al menos del principio y final de la imagen. La longitud de un rollo standard deberá ser de 533,7 m como mínimo (excepto cuando sea absolutamente inevitable) y 610 m como máximo.

e) Señal para el motor. Deberán ser marcas circulares opacas con el borde transparente, sacadas del negativo, que tendrá cuatro

cuadros consecutivos taladrados limpiamente con agujeros de 2,4 mm (0,094″) de diámetro. El centro de estos agujeros deberá encontrarse en el centro de la distancia entre el primer taladro superior y el se-

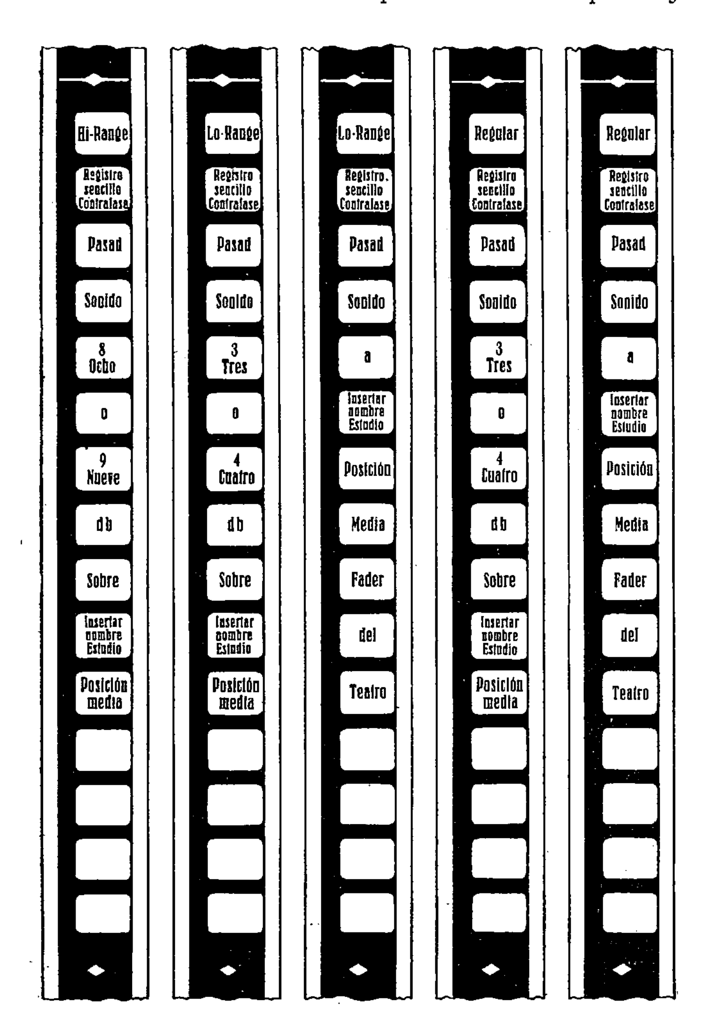


FIG. 186. Instrucciones sobre posición del fader

gundo de la perforación de cada cuadro, y a 7,1 mm (0,281″) del borde derecho de la película visto hacia arriba y con la emulsión hacia el observador. Siguiendo a los cuatro cuadros que contienen esas marcas opacas, deberá haber 3,048 m (10′) y doce cuadros hasta el comienzo de la señal de cambio de máquina, es decir, unos 172 cuadros aproximadamente.

f) Señal para cambio de máquina. Consta de 4 cuadros, con marcas circulares opacas de las mismas dimensiones y posición que las anteriores. Siguiendo a estas marcas del cambio, deberá haber 18 cuadros hasta el comienzo de la cola de parada.

g) Cola de parada. Debe ser opaca y de 90 cm (3′) de longitud.

h) Cola de identificación. (Título y parte final). Deberá contener 24 cuadros, en cada uno de los cuales se lea en caracteres negros sobre fondo blanco: *a)* «Fin de parte», *b)* número del rollo (números árabes no menores de $^1/_4$ de la altura del cuadro), y *c)* título de la película.

i) Cola protectora. Será idéntica a la cabeza protectora.

Estos datos de normalización han sido bien establecidos teniendo en cuenta las necesidades de proyección y de registro, pero debemos decir que desgraciadamente no son seguidos en la medida que sería de desear.

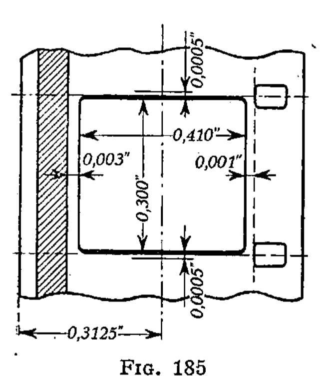


Fig. 185

En cuanto a la película de 16 mm y debido a los métodos de producción por reducción óptica (¹), nos encontramos algo lejos de poder dar normas semejantes. Si la reducción óptica se hace a base de la película normal, se encuentra que siendo las aperturas de los proyectores para la película de 35 mm de 0,600″ por 0,825″ y para los de 16 mm de 0,284″ por 0,380″, las relaciones de la altura a la anchura son respectivamente 0,728″ y 0,748″; de aquí se sigue que una reducción óptica basada en los anchos de las películas de 16 y 35 mm produce distintos resultados que la basada en las alturas de los correspondientes cuadros. Para que el lector tenga una idea en el caso de la reducción según las alturas, damos la figura 186, en la que se aprecian las dimensiones más importantes.

Especificación sobre la posición del Fader para cada copia y rollo. Aun cuando la práctica usual sobre el volumen en la sala suele ser el manejo del Fader o atenuador según el criterio del operador o, mejor aún, del director del teatro, a partir de diciembre de 1937 se han dado normas por la A. M. P. A. S. (teniendo en cuenta, sobre todo, la distribución de películas lanzadas por los estudios americanos con el calificativo de *Hi-Range)* que tienden a facilitar la labor del citado director en el manejo del Fader, y, en general, para toda clase de películas registradas con arreglo a la tendencia moderna de mover el Fader lo menos posible a lo largo de toda la película; estas normas o especificaciones se aplican a un teatro de condiciones medias normales y van, como ya hemos dicho antes, impresas en la misma pelícu-

(¹) Para este asunto, como para el estudio de las cuestiones de registro de sonido, véase nuestra obra en preparación: *Curso de cine sonoro (II Registro)*.

la (fig. 186), en la cabeza de sincronización en la siguiente forma: el primer cuadro designará el tipo de registro a que se ha hecho la copia en cuestión; el segundo designará el tipo de equipo necesario para la reproducción de la citada copia; y los nueve cuadros siguientes la posición general del Fader especificada o referida a la posición media del Fader para la copia en cuestión. Los cuadros siguientes restantes podrán ser empleados para cualquier información adicional que el estudio desee transmitir al teatro.

Estas instrucciones ayudan grandemente a los directores de teatro para obtener una buena exhibición de la copia en cuestión, y con respecto a ellas haremos las siguientes aclaraciones:

La designación *Regular* indica que sólo se ha hecho un tipo de registro de la película en cuestión, mientras que las designaciones *Hi-Range* y *Lo-Range* indican que se han distribuído dos tipos de copias con registros distintos; todas las películas editadas en *Hi-Range* (gran latitud de volumen) deberán editarse necesariamente en *Lo-Range* (baja latitud o volumen normal).

Las designaciones *single* y *push-pull* (sencillo y en contrafase) indican si el sistema reproductor debe ser de uno u otro tipo; en general, ambas indicaciones se encuentran escritas en las cabezas de sincronización; pero en los estudios o laboratorios, deberá tacharse aquella indicación que no corresponda al registro de la copia considerada.

La posición aconsejada del Fader indica el más perfecto equilibrio entre el diálogo y la música, para el rollo correspondiente.

FIG. 187. Área variable simple

Los dos tipos elementales de registro y el ruido de fondo. Aun cuando más adelante vamos a establecer una distinción entre los distintos sistemas de registro, reconocibles de una simple inspección de la película, indicaremos ahora, para comprender fácilmente después las características diferenciales de aquéllos, los dos sistemas *simples* de registro de los cuales son variantes los demás, y también para darnos cuenta, aunque sólo sea de un modo cualitativo, de en qué medida se consigue la reducción del nivel de ruido y, consiguientemente, el aumento de latitud de volumen que inmediatamente vamos a definir. En el sistema de *área variable* (fig. 187) atribuído a la R. C. A., la banda sonora está dividida en dos partes, de las cuales la una es transparente y la otra opaca; pero la línea de separación entre ambas no es una recta

media más que en el caso de no modulación o silencio, y en los demás es una curva oscilante con crestas y valles más o menos agudos según la onda sonora; a sonidos muy intensos corresponden zonas con una región transparente más ancha que la opaca, y, por el contrario, en los pasajes de bajo volumen, la parte transparente no penetra apenas en la media zona opaca. En el método de *densidad variable* originario de Western Electric, la banda sonora aparece con una serie de estriaciones o rayas más o menos oscuras y normales a la dirección del movimiento de la película. Estas estriaciones varían con la modulación del sonido en cuanto a su opacidad, a partir de una transparencia media que se obtiene en los silencios; cuanto más bajo sea el nivel sonoro, más próxima estará la opacidad o densidad de las estrías, respecto a la densidad media del silencio (fig. 188).

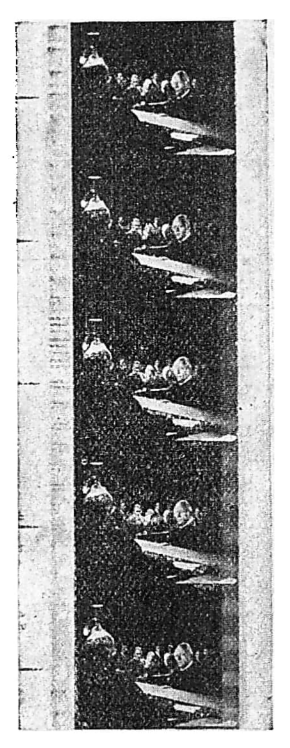


Fig. 188. Densidad variable

Estos dos sistemas de registro todavía hoy en uso, adolecen del inconveniente de producir en los momentos de silencio *un ruido de fondo* o silbido (muy semejante al que produce la portadora de una emisora de radiodifusión), poco agradable, el cual es originado por el *halo* de la película, la distribución irregular de la granulación de la plata sensible, la desigual transparencia o irregularidades de la emulsión, partículas de polvo depositado en las partes transparentes, rayas, etc.; estos elementos, al pasar ante la apertura óptica de exploración del sistema reproductor de sonido, interrumpen el haz de luz, produciendo una verdadera modulación en la corriente de la célula fotoeléctrica, que se traduce en aquel ruido indeseable frente a la señal apetecida. Como todas estas partículas están distribuídas al azar, la potencia de modulación será proporcional a la anchura de la parte clara, en caso de registro de área variable; sin modulación, esto es, sin registro de señal en la banda sonora, la parte clara tiene una anchura igual a la mitad de la banda sonora, y la línea de separación es la *línea cero* o eje de la onda registrada durante la modulación, y el ancho de la parte clara determina la máxima amplitud de la modulación sin deformación; una señal que tenga una amplitud mayor tendrá, evidentemente, deformación, porque sus crestas estarán cortadas y se introducirán por ello armónicos; en cambio, con niveles más bajos de modulación, la parte clara o transparente será excesivamente ancha, y, por tanto, los agentes de ruido estarán en cantidad excesiva en esa parte y habrá ruido de fondo; resulta, pues, que un

medio de disminuir este ruido será reducir el exceso de anchura de la parte clara durante los momentos en que hay un nivel bajo de modulación, y todo sistema que conduzca a ello se llama *reductor de ruidos (noiseless recording devices*, en inglés; *Klarton* o *Reintonverfahren*, en alemán) o simplemente *reductor*. Vamos a dar algunas definiciones que nos ayudarán a comprender los medios utilizados para aumentar la *fidelidad* en el registro del sonido en ambos sistemas, y en los que posteriormente indicaremos, y cómo es posible reducir aquel ruido.

Latitud de volumen. Para tener una idea de la influencia del ruido de fondo en el registro y reproducción del sonido, vamos a establecer un paralelismo como el caso de la modulación de una onda portadora en radiodifusión (véase de esta misma colección la obra de S. CORDOVÉS, *Fundamentos de Radioelectricidad)*, y para ello daremos algunas definiciones:

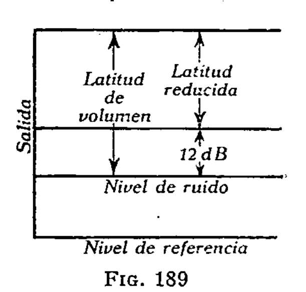


FIG. 189

De igual modo que en Radioemisión se necesita que la relación señal ruido sea superior a un cierto valor, para que la emisión sea eficaz y no se vea perturbada o cubierta por el ruido, siendo su eficacia tanto mayor cuanto mayor sea el valor de esa relación, aquí sucede algo semejante, pero en lugar de tomar dicha relación tomaremos veinte veces el log decimal de dicha relación, expresando el resultado en decibelios, y a dicho valor le denominaremos *latitud de volumen* del sistema en cuestión; de otra manera, la eficacia de nuestro sistema de registro se define por su latitud de volumen, que es el número de decibelios que hay entre el nivel máximo de la señal o sonido sin deformación (o con una deformación inferior a un 2 ó un 3 %), llamado *nivel de sobrecarga*, y el *nivel* máximo *del ruido de fondo*, que es el nivel del ruido que se produce en razón del registro en una escena en la que hay un silencio o, como se dice, no hay modulación (fig. 189). De esta definición se deduce que hay dos maneras de aumentar la latitud de volumen: de un lado aumentar el nivel de sobrecarga, y de otro reducir el ruido de fondo, y, aún, efectuar ambas cosas a la vez; la reducción del ruido de fondo es el sistema empleado en registro y de él nos ocupamos después.

Hagamos, no obstante, una observación aplicable principalmente a los sistemas de reproducción, tema fundamental de esta obra; aumentando la potencia del equipo, y, por consiguiente, el nivel de sobrecarga, no siempre aumenta necesariamente la latitud de volumen, como a primera vista podría pensarse, a menos que se mantenga o se reduzca el nivel de ruido, y en algunos casos esa latitud puede quedar reducida e incluso invertirse, con lo que el sistema sería sólo un sistema reproductor de ruidos; por ejemplo, si la plena potencia del nivel de ruidos de nuestro sistema es de 3 dB y su latitud de volumen de 5 dB (lo que equivale a que su nivel de sobrecarga sea de 8 dB), y para obtener mayor volumen a plena potencia aumentamos ésta con un

paso amplificador suplementario (véase Capítulo XV *Amplificación en potencia*), cuya ganancia intrínseca sea de 20 dB; este paso aumenta el nivel de ruido del sistema hasta 23 dB, mientras que la señal sólo aumenta en 20 — 8 = 12 dB, y, por tanto, la latitud de volumen es ahora: 12 — 23 = —11 dB, lo que vale tanto como decir que el ruido tiene un nivel de 11 dB por encima del sonido, y así, pues, éste queda completamente cubierto o enmascarado por el ruido, y el sistema es más potente, pero no eficaz [1].

Como resultado de una serie de experimentos se ha comprobado que el sonido de amplitud mínima que se ha de registrar en la película no resulta interferido o enmascarado por el ruido de fondo, cuando aquella amplitud es por lo menos cuatro veces la amplitud máxima del ruido de fondo; es decir, cuando entre ambas amplitudes existe una diferencia de nivel de $20 \log {}^4/_1 = 12$ dB (Eggert-Schmidt); de este modo, la latitud de volumen queda reducida en esos 12 dB, y la nueva latitud así definida se llama *latitud de volumen reducida*. Admitida esta limitación, cuyo objeto es garantizarse suficientemente contra la molestia del ruido de fondo en los pasajes de bajo nivel sonoro en la señal, la latitud reducida será la diferencia de niveles entre los sonidos cuyas amplitudes máxima y mínima deben registrarse en la película, y en cuya latitud no existe ningún vestigio de ruido extraño provocado por el registro.

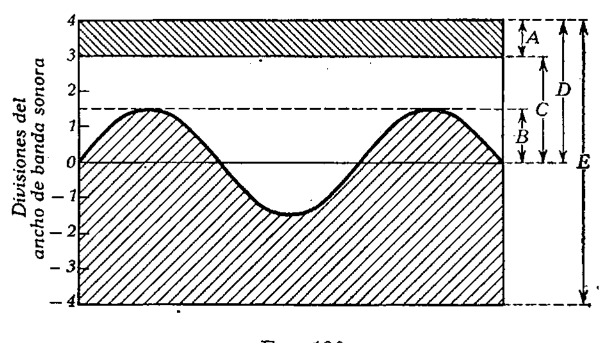


FIG. 190

A = Cantidad de reducción ruido.
B = Amplitud modulación.
C = Amplitud de la portadora.
D = Parte clara de la banda sin modulación, ni reductor de ruido.
E = Ancho de la banda sonora.

Banda sonora [2]. Aunque impropiamente, llamaremos así a la anchura total de la zona sonora, que es el área explorada por la apertura óptica del sistema reproductor (fig. 190).

---

[1] Este ejemplo está tomado de nuestro trabajo: *Realimentación negativa y características compuestas*, publicado en la revista «Euclides», 1946.

[2] Aun cuando la figura 190 se refiere al caso de área variable, bastaría trazar el «sólido de densidades», es decir, tomar sobre un eje paralelo a la progresión de la banda las abscisas de la misma, y sobre el otro las densidadescor respondientes a esos puntos (así como las ordenadas de máxima y mínima densidad registrable sin deformación en la banda), para tener una figura semejante y aplicable al caso de densidad variable; esto tiene, además, la ventaja de simplificar las diferencias entre ambos sistemas, y nos llama la atención no haberlo visto utilizado en la literatura corriente sobre el asunto, al menos como medio intuitivo de exposición.

Portadora. Es la magnitud que cuando varía en cantidad constituye el registro.

Amplitud de la portadora. Es el ancho de la región clara sin modulación en el caso de área variable, y la densidad media o densidad sin modulación en el caso de densidad variable: también puede expresarse por la transmisión media y en iguales condiciones.

Porcentaje de modulación. Representa en cada instante el porcentaje de la portadora cubierto por la modulación, y se expresa en tanto por ciento; será, pues, la relación entre la amplitud de modulación y la amplitud de la portadora expresada; como hemos dicho en la figura 190, es $\frac{100\,B}{C}\,\%$.

Margen. Es la anchura de banda clara comprendida entre la cresta de la amplitud de modulación y la parte de la misma banda clara cubierta por el sistema reductor de ruido o simplemente *reductor* expresado en niveles en dB[1] (área variable); o bien, el exceso de transmisión positiva sobre la indispensable para *llevar* [2] la señal moduladora (densidad variable); este margen se expresa en decibelios en la forma

$$\text{Margen: } M = 20 \log \left(\frac{\text{amplitud portadora}}{\text{amplitud modulación}}\right) \text{dB};$$

o bien:

$$M = 20 \log \left(\frac{100}{\%\ \text{modulación}}\right) \text{dB},$$

habida cuenta de la definición del porcentaje de modulación.

Por lo general, el margen normal en la práctica nunca es inferior a 6 dB, y ello por dos razones: en primer lugar, el equipo reductor de ruidos empleado es siempre de tipo diferido, es decir, que no funciona instantáneamente, sino al cabo de un cierto tiempo y, por tanto, con velocidad finita, y en tal caso, ese margen ayuda a reducir su velocidad de funcionamiento, dando tiempo a ensanchar la banda clara, cuando se produce una modulación creciente; en segundo lugar, el ajuste del margen suele hacerse con una onda sinusoidal pura, cuyo valor eficaz no es tan grande como el de una de las ondas complejas que se presentan en la práctica del registro del sonido, y como la respuesta de los circuitos del sistema reductor es aproximadamente proporcional al valor eficaz del nivel de entrada en los mismos, su respuesta a una onda sinusoidal es insuficiente para acomodarse a la modulación más alta de una onda compleja.

---

(1) Obsérvese que $M = 20 \log \frac{C}{B} = 20 \log C - 20 \log B$, lo que justifica esa definición; por otra parte, $20 \log \frac{C}{B} = 20 \log \frac{100}{100\ B/C} = 20 \log \frac{100}{P}$, donde P es el porcentaje de modulación.

(2) Con esta palabra queremos indicar la transmisión correspondiente a la señal moduladora.

Características esenciales del sonido registrado

Es evidente que para que los sistemas reproductores de sonido den las características de realismo que el espectador normal percibe en la *acción* que se desarrolla en la pantalla de un buen local, no basta que aquellos sistemas tengan características excelentes, en cuyo estudio entraremos más tarde, sino que se requiere, además, que el sonido registrado en la película cumpla una serie de condiciones y carezca de causas que lo deformen, ensucien, o le hagan perder su presencia y brillantez inicial; pues, en tal caso, si el sistema reproductor es *fiel*, todos estos defectos acrecentados por los residuales, inevitables de la reproducción, aparecerán en la audición en la sala; interesa, pues, que el registro sea de la mayor pureza y calidad posible, y para ello precisa atender a tres características esenciales del mismo:

a) Gama de frecuencias registrada.

b) Gama de niveles de intensidad, obtenible sobre el nivel de ruido de fondo.

c) Reducción en el mayor grado posible del nivel de este ruido de fondo.

a) Con relación a este primer aspecto, no sólo interesa poder representar una gama de frecuencias lo más amplia posible, sino que ello se consiga con la mayor *fidelidad*, y ambas posibilidades, como sucede casi siempre, son hasta cierto punto encontradas o contrapuestas. Son muchas las causas que originan una deformación en frecuencia, bien sea introduciendo o suprimiendo algunas frecuencias o pequeñas gamas de éstas [1], bien originando una verdadera intermodulación, modificando la amplitud relativa de algunas de ellas o su fase e incluso limitando la anchura de la gama registrable. Como ya hemos hecho notar en otro trabajo, la gama audible según Mees, de Kodak, se extiende desde aproximadamente 16 c/s hasta unos 20 000 c/s; las dos últimas octavas son, no obstante, de poca importancia cuando se consideran sonidos puros; es decir, es muy raro encontrar en la práctica un sonido de frecuencia superior a los 5000 c/s si no es con un fin experimental y no meramente artístico. No obstante, las frecuencias entre 5000 y 10 000 c/s son de considerable importancia, porque representan sobretonos o armónicos de sonidos de más baja frecuencia, cuya supresión modifica el timbre de éstos. En la conversación, las sibilantes y especialmente las consonantes no pueden reproducirse correctamente más que si se conservan sus armónicos en el mencionado intervalo. En los primeros tipos de películas sonoras

[1] Muchas de estas causas de deformación inherentes al sistema óptico empleado en el registro y reproducción se encuentran detalladas y explicadas en nuestro trabajo: GIL-SANTIAGO, *Algunas ideas sobre la óptica del sonido y la reproducción en cinematografía.*

sólo era interesante el registro entre 100 y 5500 c/s, porque dicha banda estaba limitada por los sistemas reproductores, más concretamente, por sus altavoces, incapaces de reproducir frecuencias mayores, y hasta, en algunos casos, esta limitación superior estaba presente en el propio amplificador del teatro.

Esta gama se ha extendido modernamente entre 50 y 8000 c/s, pues como se menciona en el Capítulo X, aunque no perfecta es suficiente para una buena reproducción de la música y la palabra. Más recientemente, tanto los equipos de registro como de reproducción se han mejorado en tal proporción que alcanzan hasta los 10 000 c/s, de tal modo que para teatros de primera calidad en los que se encuentren instalados dichos equipos, se requiere el uso de material fotográfico de un poder de resolución algo mayor que el empleado en los registros hasta los 8000 c/s. Por último, aun esta gama resulta insuficiente cuando de la ejecución de una sinfonía por una orquesta calificada se quiere obtener la sensación de *realismo*, *presencia* y *relieve* (sonido estereofónico) que experimenta un observador cuando escucha una tal orquesta. En ella se llega hasta los 15 000 c/s, y para la citada reproducción se necesitan, además de procedimientos especiales de registro, otros medios de que hablaremos en el Capítulo XIX. Vemos, pues, que una de las principales causas que limitan la banda registrable es el *poder de resolución o poder separador de la película.*

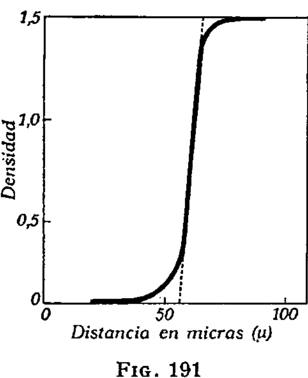


FIG. 191

Con referencia a este poder separador, conviene que hagamos algunas observaciones que nos mostrarán las causas por las cuales éste limita —si no existieran otras causas— la frecuencia de corte superior registrable en la película y cuáles son los medios que se han ideado para elevarla; en primer lugar, debemos hacer notar que, según vimos al dar la expresión del poder separador (Capítulo II), en éste interviene la longitud de onda, y para nadie que conozca un poco las cuestiones de óptica es una novedad que empleando la menor longitud de onda posible (luz ultravioleta), se consigue aumentar tal poder de resolución; esto es lo que ha comenzado a hacerse desde algunos años, especialmente en los registros con área variable, en los que se requiere que el contraste entre la zona oscura y la clara del registro sea lo más agudo posible.

Por otra parte, este poder de resolución del material fotográfico está limitado por la difusión de la luz incidente que producen la granulación de las sales de plata de la película, y su efecto puede apreciarse fácilmente considerando lo que sucede a un haz de luz incidente limitado por un borde agudo o vivo, cuando esta luz cae sobre la película; la luz es reflejada por los granos de plata y difundida en la sombra,

y la extensión de esta difusión depende del poder reflector de esos granos, de su tamaño y de la absorción por la emulsión de la luz difundida; dicho borde dará, pues, una imagen que no será una arista viva de sombra, sino que presentará el aspecto cuya representación se da en la figura 191. La pendiente de la parte recta de esta curva es lo que mide la *«viveza» o agudeza del contraste*, y aun cuando el poder de resolución sea todavía suficiente, una disminución de viveza en el contraste origina una sombra de luz difundida en los valles de la onda registrada, lo que produce una pérdida de modulación al aumentar la frecuencia.

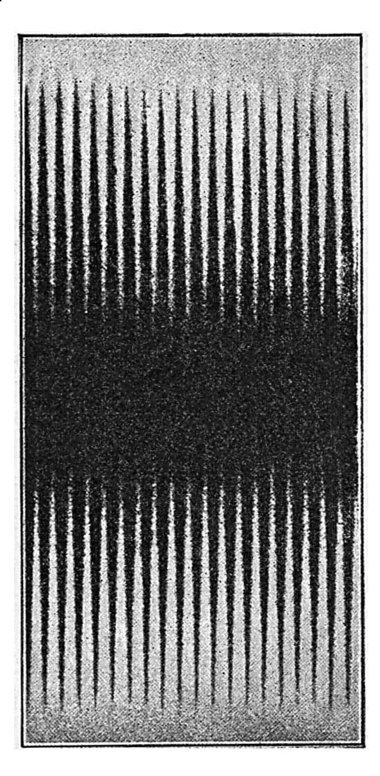


Fig. 192

Según un cálculo que hemos dado en nuestro anterior trabajo [1], el poder separador, limitado solamente por el efecto de difracción, permite registros de hasta 13 000 ó 15 000 c/s, no encontrándose tampoco limitado el poder separador por el grano de la película y el efecto de difusión de que hemos hablado, cuando esta película es de grano fino y de las de buena calidad empleadas con tal finalidad. Conviene advertir, no obstante, que el ajuste del foco del sistema óptico empleado para el registro es, con tales frecuencias, de fundamental importancia, pues un desplazamiento de una pequeña fracción de milímetro en el enfoque causa cambios desde una excelente modulación hasta una densidad prácticamente uniforme en el caso incorrecto. La figura 192 muestra una microfotografía de un registro en área variable de 10 000 c/s; aquí la definición y viveza de contraste no es perfecta; pero aun así, la depresión de volumen sonoro producida por la difusión no es muy grande.

b) **Gama de niveles de intensidad.** Del estudio efectuado en el Capítulo X sobre la reproducción de la música y la palabra, se deduce que aunque sea posible reproducir ambas con una calidad muy aceptable en cines para gamas de frecuencias que alcancen hasta los 5 u 8 kc/s, las vibraciones de aire de una buena orquesta sinfónica deben alcanzar de 40 a 15 000 c/s en una ejecución natural, y éste deberá ser el ideal para una reproducción estereofónica.

---

[1] Loc. cit.

Paralelamente, los volúmenes manejados por tal orquesta varían entre unos 30 dB sobre el umbral de audición, hasta unos 110 a 115 dB, esto es, una gama de unos 80 dB, en la hipótesis de que el nivel de enmascaramiento sea el mínimo posible y menor, desde luego, que aquellos 30 dB; esto sería lo ideal, y con bastantes complicaciones conseguido hasta el día, en sonido estereofónico, acudiendo a recursos que no pueden adaptarse en el estado actual de la técnica a los equipos comerciales de reproducción sonora, corrientes en cines y teatros.

Para tales equipos, en buena teoría, debería, pues, ser posible registrar en la película latitudes de 80 dB, comprendidos entre los pasajes de máximo volumen y los pasajes silenciosos en que no existe más que el ruido de fondo que, según hemos admitido antes para la latitud reducida, debe estar 12 dB por debajo de aquel volumen mínimo.

Prescindiremos de momento de que el equipo reproductor tenga potencia suficiente para manejar tales volúmenes; al igual que con la gama de frecuencias, inicialmente y con los dos métodos sencillos de registro sin *reductor de ruidos*, se lograron latitudes de volumen de unos 20 dB, y aun aceptando un ligero ruido de fondo, hoy, desde luego, inadmisible en el estado actual de la técnica, se pudo llegar a los 30 ó 35 dB; esto explica por qué en las primeras películas sonoras había muy poca variedad en las escenas, en cuanto a volumen se refiere (el *Fader*, aun hábilmente manejado, es incapaz de producir tal variedad), cuyo registro se hacía en una sola posición del micrófono y con *micros* no direccionales; la música y los efectos sonoros se registraban en el momento de ejecutar la *acción* proyectada, ya que apenas se conocía la utilidad del sistema de *re-reccording* (registro de un sonido registrado previamente). Mediante el empleo conveniente de tal técnica y los sistemas de reducción de ruido, así como los registros en *(push-pull)* contrafase y los más modernos de densidad variable *comprimido o aplastado (squeeze o matte track)*, se han logrado latitudes de volumen de 55 a 60 dB en teatros de características medias y *sin necesidad de mover el Fader*, esto es, sin cambiar la amplificación del equipo reproductor del teatro. De otra parte, mediante la adjunción de igualadores complementarios, simultáneamente en el registro y la reproducción, relativamente económicos, se logra una variación complementaria de unos 6 a 8 dB. No obstante, muy poco de lo que antecede es aplicable a la gran mayoría de los teatros de nuestro país; en verdad que hay muy pocos equipos reproductores que satisfagan a los requisitos necesarios para manejar volúmenes tan altos eficientemente, o sea, sin que las deformaciones por sobrecarga excedan de un 2 a un 3 %; por otra parte, tales registros, en razón de las condiciones pasadas del conflicto mundial, apenas han llegado a nuestro país. Es por estas razones que los registros corrientes, mediante los dos sistemas primitivos, sólo consiguen volúmenes de unos 40 dB, a expensas de una gran deformación en amplitud.

Insuficiencia de la latitud reducida de los primeros registros. Vamos a aplicar lo dicho anteriormente a un ejemplo típico para ver cómo la

insuficiencia de la latitud reducida ha llevado a la técnica actual de empleo de los sistemas reductores; imaginemos un registro a densidad variable en el que la amplitud máxima de la transparencia correspondiente a un sonido registrado, respecto a la transparencia sin modulación, toma el valor $\pm 0{,}28$, y la amplitud máxima del ruido medida empíricamente, toma el valor $\pm 0{,}01$; la latitud reducida valdrá

$$L_r = 20 \log \frac{0{,}28}{4 \times 0{,}01} = 17 \text{ dB};$$

si fuera posible reducir por algún sistema el ruido de fondo, de modo que la amplitud máxima correspondiente de transparencia fuera sólo de $\pm 0{,}004$, la latitud reducida valdría

$$L_r = 20 \log \frac{0{,}28}{4 \times 0{,}004} = 25 \text{ dB},$$

es decir, habría aumentado en 8 dB; si conservando el primitivo ruido, logramos aumentar la amplitud de transparencia correspondiente al sonido, hasta el valor máximo que en la práctica es posible alcanzar $\pm 0{,}5$ sin deformación, la latitud se habrá convertido en

$$L_r = 20 \log \frac{0{,}5}{4 \times 0{,}01} = 22 \text{ dB}$$

y ahora se habrá conseguido un aumento de 5 dB.

Estas cifras encontradas de 17 y 22 dB son valores aproximados, y en la práctica podremos tomar como término medio de ambas unos 20 dB, valor antes señalado en la época inicial de registro de sonido en película con cualquiera de los dos métodos entonces empleados sin reductor, y que, desde luego, es inferior a la gama normal de sonidos que hoy se utiliza de los 60 a 70 dB y corresponde a cualquier sonido que pueda tener lugar en cualquier escena de una película.

Para lograr niveles fuera de esa gama, el operador que maneja el Fader del equipo reproductor de un teatro debe estar muy atento a la escena que es proyectada en la pantalla y mover el mismo con verdadera habilidad, de modo que los niveles extremos de los sonidos correspondientes a la escena en cuestión queden recogidos en esa latitud de 20 dB y lo más aproximados posible a su nivel normal o real en la vida que tal escena representa; es decir, deberá desplazar el Fader modificando la ganancia de su amplificador y suponiendo que éste tenga capacidad suficiente, de modo que la latitud de 20 dB se desplace a lo largo de la gama de 65 dB, para que la mayoría de los sonidos de la escena sean reproducidos a su nivel normal. Como esto es imposible para todos, algunos serán reproducidos muy altos y otros muy bajos, y necesariamente la escena carecerá de naturalidad y realismo, en unos casos, y en otros llegará a tener un exceso de ruido; así, si el operador coloca su Fader suficientemente alto para que se alcancen los 70 dB en la reproducción correspondiente a un fuerte ruido que aparece en la escena, el ruido de fondo del registro alcanzará ya

un nivel de 50 dB, que viene a ser el del ruido medio de una calle en una gran ciudad, que será molesto, y además todas las conversaciones normales de la escena alcanzarán un nivel de más de 62 dB, en lugar de los 40 que como máximo suelen tener aquéllas. Si, por el contrario, en la escena tiene lugar una conversación en voz baja o «siseo» y el operador coloca el Fader de modo que este sonido sea reproducido a su volumen normal de unos 30 dB, entonces todo sonido de esta escena de nivel normal superior a los 50 dB será reproducido a un nivel inferior al suyo característico. Vemos, pues, que se requiere una atención muy prolongada por parte del operador y una gran habilidad en el uso del Fader, y aun así, las escenas carecen de elasticidad de *acción*. Es ésta casi la principal razón que ha determinado la introducción de los sistemas reductores de ruido de fondo con el fin de alcanzar una latitud reducida de unos 70 dB, con la que, como hemos dicho a su tiempo, los movimientos del Fader, cuando sean indispensables, son de muy pocos decibelios y las escenas cobran todo su realismo. Se comprende fácilmente que para ello es también indispensable que el equipo reproductor tenga potencia suficiente para manejar niveles tan altos, pero de esto nos ocuparemos más adelante.

c) **Reducción del nivel de ruido y su relación con la amplitud del sonido registrado.** Siendo la potencia de modulación de los elementos de ruido proporcional a la anchura de la parte clara o transparente de la banda de sonido, resulta en el caso de área variable, por analogía con el caso de la corriente alterna y consideraciones en las que no vamos a entrar, que *la amplitud del ruido de fondo es proporcional a la raíz cuadrada del ancho de la misma.* Veamos lo que sucede en el caso de densidad variable, y para ello vamos a tomar una banda sonora con zonas de ennegrecimiento o densidad óptica [1] creciente de unas a otras, pero uniforme en cada una; *zonas estáticas*, como suelen llamarse. El ruido de fondo será tanto menor cuanto mayor sea la opacidad de la zona respectiva, lo que es debido a que las partículas microscópicas de polvo y demás agentes que lo originan producen alteraciones en el flujo de luz que el equipo reproductor de sonido deja pasar a la célula, a través de la película, o lo que es equivalente, oscilaciones en la transparencia de la zona de película, las cuales son tanto menores cuanto mayor es el ennegrecimiento de dicha zona; así, por ejemplo,

---

[1] Se llama *transmisión* o *transparencia* al porcentaje de la luz incidente, que pasa a través de la película $T = 100 \frac{L_t}{L_i}$ y varía entre el máximo de un 100 % y el valor cero. Generalmente se expresa en función de la *densidad óptica* O, con la cual está relacionada por la expresión

$$D = \log \frac{1}{T} \qquad \frac{1}{T} = \text{opacidad} = O;$$

a la inversa de la transmisión se le llama también *opacidad* O. La transmisión varía entre 1 y cero, la opacidad entre uno e infinito y la densidad entre cero e infinito. La más usualmente empleada es la densidad (véase la tabla siguiente).

si la densidad óptica de la zona vale $D_0 = 0,2$ y el ruido de fondo produce oscilaciones de densidad de $\pm$ 0,01, la densidad varía entre $D_{máx.} = 0,21$ y $D_{mín.} = 0,19$, que según la tabla adjunta corresponden a transparencias $T_{máx.} = 64,5\ \%$ y $T_{mín.} = 61,7\ \%$; es decir, una variación con respecto a la transparencia que corresponde a D_0, de $\frac{6,45 - 61,7}{2} = \pm 1,4\ \%$. En cambio, si la densidad $D_0 = 1,2$ y con igual amplitud en las oscilaciones de densidad de 0,01 se tuviese una $D_{máx.} = 1,21$ y una $D_{mín.} = 1,19$ a las que corresponden $T_{máx.} = 6,45\ \%$ y $T_{mín.} = 6,17\ \%$, la oscilación de T sería ahora de $\frac{6,45 - 6,17}{2} = \pm 0,14\ \%$. Pero siendo la energía del sonido proporcional al cuadrado de la luz transmitida, y, por consiguiente, proporcional al cuadrado de la transparencia, la relación de energías sonoras de los dos ruidos de incrementos de transparencias ΔT_2 y ΔT_1 serán expresados en decibelios por

$$R = 10 \log \frac{\Delta T_2^2}{\Delta T_1^2} = 20 \log \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = 20 \log \frac{1,4}{0,14} = 20 \text{ dB}.$$

En la figura 193 se ha representado gráficamente *la proporcionalidad que existe entre la transparencia D_0 de las zonas estáticas* y *la amplitud del ruido de fondo*, medida esta última en variaciones de transparencia respecto a la de la zona estática. De esta proporcionalidad resulta que reduciendo la transparencia D_0 se reduce la amplitud del ruido de fondo. La tabla que damos a continuación permite determinar valores de R y es muy útil en cuestiones de registro.

Tabla de relación entre Densidades ópticas y Transparencias

T	D	T	D	T	D	T	D	T	D
1,00	0,00	0,80	0,10	0,60	0,22	0,40	0,40	0,20	0,70
0,99	0,00	0,79	0,10	0,59	0,23	0,39	0,41	0,19	0,72
0,98	0,01	0,78	0,11	0,58	0,24	0,38	0,42	0,18	0,74
0,97	0,01	0,77	0,11	0,57	0,24	0,37	0,43	0,17	0,77
0,96	0,02	0,76	0,12	0,56	0,25	0,36	0,44	0,16	0,80
0,95	0,02	0,75	0,12	0,55	0,26	0,35	0,46	0,15	0,82
0,94	0,03	0,74	0,13	0,54	0,27	0,34	0,47	0,14	0,85
0,93	0,03	0,73	0,14	0,53	0,28	0,33	0,48	0,13	0,89
0,92	0,04	0,72	0,14	0,52	0,28	0,32	0,49	0,12	0,92
0,91	0,04	0,71	0,15	0,51	0,29	0,31	0,51	0,11	0,96
0,90	0,05	0,70	0,15	0,50	0,30	0,30	0,52	0,10	1,00
0,89	0,05	0,69	0,16	0,49	0,31	0,29	0,54	0,09	1,05
0,88	0,06	0,68	0,17	0,48	0,32	0,28	0,55	0,08	1,10
0,87	0,06	0,67	0,17	0,47	0,33	0,27	0,57	0,07	1,15
0,86	0,07	0,66	0,18	0,46	0,34	0,26	0,58	0,06	1,22
0,85	0,07	0,65	0,19	0,45	0,35	0,25	0,60	0,05	1,30
0,84	0,08	0,64	0,19	0,44	0,36	0,24	0,62	0,04	1,40
0,83	0,08	0,63	0,20	0,43	0,37	0,23	0,64	0,03	1,52
0,82	0,09	0,62	0,21	0,42	0,38	0,22	0,66	0,02	1,70
0,81	0,09	0,61	0,21	0,41	0,39	0,21	0,68	0,01	2,00

Expresión de la reducción del nivel de ruido. Se expresa en decibelios en términos de la reducción de su amplitud en la forma

$$NR_{dB} = 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

en la que r_1 representa la amplitud de ruido inicial y r_2 la que aquél tiene después de aplicar el sistema reductor; claro está que después de lo que dijimos antes respecto a la proporcionalidad de dichas amplitudes, en los casos de área variable y densidad variable, para el primer caso, se tendrá

$$NR_{dB} = 20 \log \sqrt{\frac{C}{D}}$$

mientras en el segundo:

$$NR_{dB} = 20 \log \frac{T_2}{T_1}$$

siendo aquí T_1 y T_2 las transmisiones medias positivas antes y después de aplicar el sistema reductor.

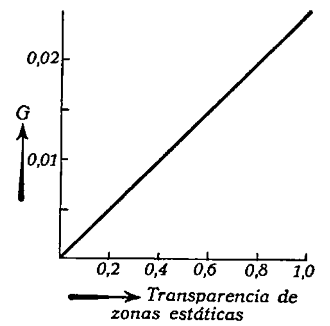


FIG. 193. Relación entre la transparencia y amplitud del ruido de fondo G de zonas estáticas. Amplitud de de ruido medida por variación de la transparencia respecto a la de reposo

Así, por ejemplo, para asegurar una reducción de 12 dB en el nivel de ruidos, se precisa reducir la transparencia media o sin modulación en una cuarta parte de su valor primitivo, para el caso de registro a densidad variable; en cambio, en el caso de área variable se precisa reducir el ancho de la parte clara de la banda sin modulación en $^1/_{16}$ de su valor original.

Latitud con reducción del ruido de fondo en el caso de área variable. Vamos a considerar un registro en área variable en el que la amplitud de ruido de fondo tome el valor $\pm$ 0,01 mientras que la máxima del sonido registrado valga 0,415; según la definición de latitud reducida que dimos anteriormente, ésta valdrá

$$L_R = 20 \log \frac{0{,}415}{4 \times 0{,}01} = 20 \text{ dB.}$$

Si por un procedimiento cualquiera reducimos el ancho de la parte clara en $^1/_{25}$ de su valor inicial, según la definición que hemos dado de la reducción de ruido de fondo, tendremos para ésta el valor

$$NR = 20 \log \sqrt{\frac{1}{25}} = - 20 \log 5 = - 20 \times 0{,}7 = - 14 \text{ dB}$$

y como la reducción correlativa de la amplitud de dicho ruido será $\frac{0{,}01}{\sqrt{25}}$, la latitud reducida valdrá ahora $L_R = 20 \log \frac{0.415 \times 5}{4 \times 0{,}01} = 34$ dB: es decir, esta latitud ha aumentado precisamente un número de

decibelios igual a aquel en el que ha sido reducido el ruido de fondo, con respecto a la latitud inicial, como era de esperar.

Sin embargo, ¿será realmente aprovechable esta latitud?, o, dicho de otro modo, ¿no se producirá deformación en el sonido al reducir en tal extensión la parte clara de la banda sonora? Para averiguarlo tengamos en cuenta que si la máxima amplitud registrable en la película vale 0,415, el porcentaje de modulación para este sonido vale, según la definición de este porcentaje, el 41,5 %; como hemos reducido

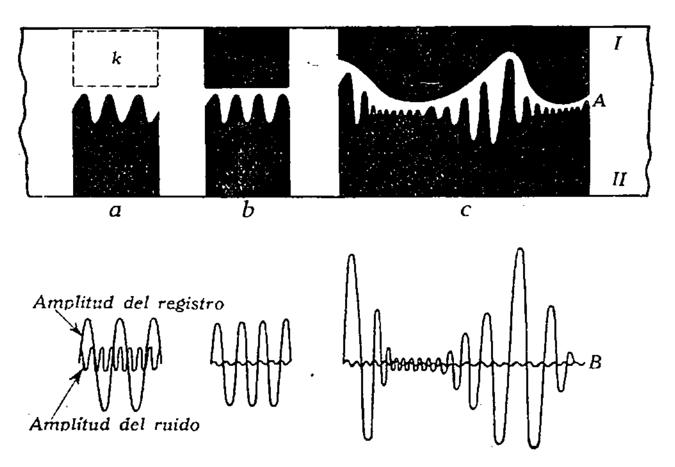


FIG. 194. Reducción de la amplitud del ruido: *a*) sin reducción de la anchura; *b*) con reducción de la parte clara; *c*) aspecto con modulación variable

la parte clara en $\frac{1}{25}$ de su anchura total, es decir, $\frac{1}{25} = 4\,\%$ de su valor inicial, queda un 64,5 % de zona clara entre la cresta de máxima amplitud de modulación y el límite de la zona clara después de la reducción, y, por tanto, no habrá peligro de que alguna cresta de modulación alcance o sobrepase el límite de la zona clara reducida, con lo que esas crestas quedarían cortadas, y, por tanto, introduciríamos armónicos con la consiguiente deformación del sonido.

Pero ahora, tanto el margen como el porcentaje de modulación, se han modificado; en efecto, el último ya hemos visto que antes de la reducción valía el 41,5 %, y el margen:

$$M = 20 \log \frac{100}{41{,}5} = 40 - 20 \log 41{,}5 = 40 - 32{,}4 = 7{,}6 \text{ dB};$$

después de la reducción de la anchura de la zona clara, la profundidad de modulación vale $\frac{B}{C}100 = \frac{41{,}5 \cdot D}{96{,}0 \cdot D}\,100 = 43{,}3\,\%$, y, por tanto, el margen:

$$M_r = 20 \log \frac{100}{40{,}3} = 40 - 20 \log 43{,}3 = 40 - 32{,}7 = 7{,}3 \text{ dB}.$$

Se ve pues, que el porcentaje de modulación ha pasado de 41,5 % a 43,3 %, es decir lo hemos *aumentado,* mientras que el margen ha cambiado de 7,6 dB a 7,3 dB con lo cual quedará *reducido* el ruido de fondo.

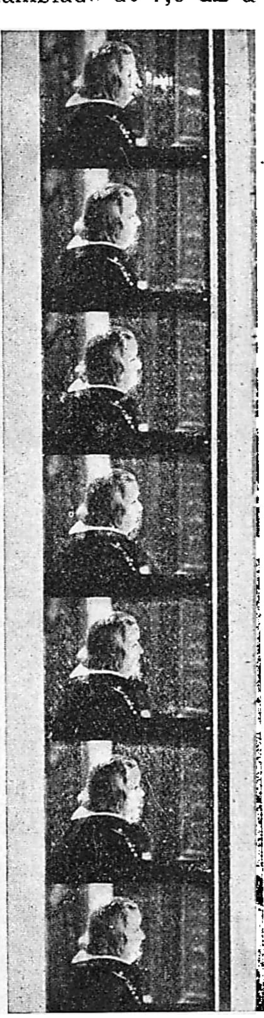
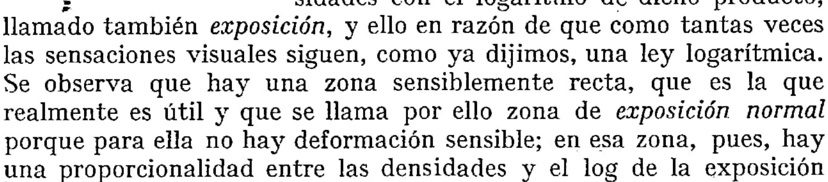


Fig. 195 Área variable con reductor

La figura 194 muestra cuál es el procedimiento seguido con este sistema de registro para reducir el ruido de fondo, y en qué medida queda reducido se representa en la misma figura de un modo intuitivo; para ello, se utilizan sistemas más o menos ingeniosos —en los que no cabe entrar aquí— para lograr que la zona clara reducida cambie de anchura al mismo ritmo que la amplitud de la modulación.

Otra variante de este sistema lo da la figura 195, en la que la línea cero del registro se ha desplazado hacia la parte clara hasta reducir el margen o zona clara sin modulación a un valor muy pequeño. Este sistema es empleado por la Metro en La reina Cristina de Suecia, y queremos prevenir a algunos operadores que por desconocimiento del asunto adquieren la creencia de que el registro está mal hecho.

Reducción del ruido de fondo en densidad variable. Para comprender en este sistema cómo se logra la reducción del ruido de fondo, se precisa conocer las curvas de Hurter-Driffel, características de una emulsión fotográfica que constituyen la base de todos los sistemas de registro de sonido y de la Sensitometría en la que aquéllos tienen su base técnica. Estas curvas (fig. 196), muy semejantes a las características de las válvulas de radio (véase Capítulo XIII), relacionan las densidades ópticas que se obtienen en una emulsión fotográfica, en función de la energía luminosa, producto de la intensidad de la luz incidente, por el tiempo durante el cual actúa sobre la emulsión; mejor aún, relacionan aquellas densidades con el logaritmo de dicho producto, llamado también *exposición,* y ello en razón de que como tantas veces las sensaciones visuales siguen, como ya dijimos, una ley logarítmica.



Se observa que hay una zona sensiblemente recta, que es la que realmente es útil y que se llama por ello zona de *exposición normal* porque para ella no hay deformación sensible; en esa zona, pues, hay una proporcionalidad entre las densidades y el log de la exposición

y a su pendiente se le llama la *gama* de la emulsión. Como consecuencia de esta proporcionalidad y por una sencilla transformación, es fácil ver que dentro de la zona de exposición normal o de proporcionalidad hay también una *proporcionalidad entre las exposiciones y las transparencias.* Teniendo ésta en cuenta, así como la figura 193, que obtuvimos anteriormente, es fácil comprender el significado de las figuras 197 *a* y *b*, las cuales representan las transparencias en función de las exposiciones para una $\bar{\gamma} = 1$; puesto que, según la figura 194, la amplitud del ruido de fondo es tanto más pequeña cuanto menor es la transparencia de la banda sonora, en el caso de registro a densidad variable, si queremos reducir el ruido de fondo, deberemos hacer la transparencia media sin modulación, tanto más pequeña cuanto menor sea la amplitud del sonido que se deba registrar en la película.

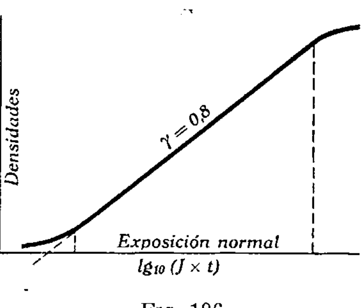


Fig. 196

En la figura 197 *a*, las líneas inclinadas *a*, *b*, *c* son las envolventes de amplitudes de oscilación crecientes en el registro, mientras que en la parte vertical se encuentran las correspondientes amplitudes de la reproducción *a'*, *b'*, *c'*. Esta figura corresponde al modo normal de trabajo sin reducción de ruido de fondo, en el que, por consiguiente, la luz correlativa de la transparencia de reposo o sin modulación permanece constante; la transparencia media, pues, para todas las amplitudes de sonido registrado, es también constante, y, por ello, será constante también la amplitud del ruido de fondo dibujado en amplitud en líneas de puntos; es fácil ver que para un sonido de pequeña amplitud como el que corresponde a *f'*, el ruido de fondo iguala o excede a dicho sonido, lo cual limita la latitud de volumen por debajo a amplitudes superiores a *f'*.

Por el contrario, en la figura 197 *b*, la luz media para el registro de la exposición correspondiente a cualquier sonido, se reduce al mínimo necesario para *llevar la señal*, permaneciendo constante la mínima intensidad de luz y la correlativa transparencia (condiciones éstas necesarias para no salirnos de la zona de exposición normal y, por tanto, evitar deformaciones). De este modo se consigue, como se ve en la figura 197 *b*, que a medida que crece el porcentaje de modulación de luz crece en igual sentido la transparencia media en el registro en la película y, por consiguiente, la luz transmitida en la reproducción a través de la película.

El resultado es, después de la figura 193, que al reducirse la transparencia de reposo que corresponde a sonidos de pequeño nivel de modulación, queda reducida proporcionalmente, y en el mismo sentido, la amplitud del ruido de fondo, siendo tanto más pequeño éste cuanto menor es la amplitud del sonido registrado; ahora el sonido *f''* no es

excedido por el ruido de fondo, y, por consiguiente, la latitud de volumen ha quedado aumentada por haberse reducido el ruido de fondo.

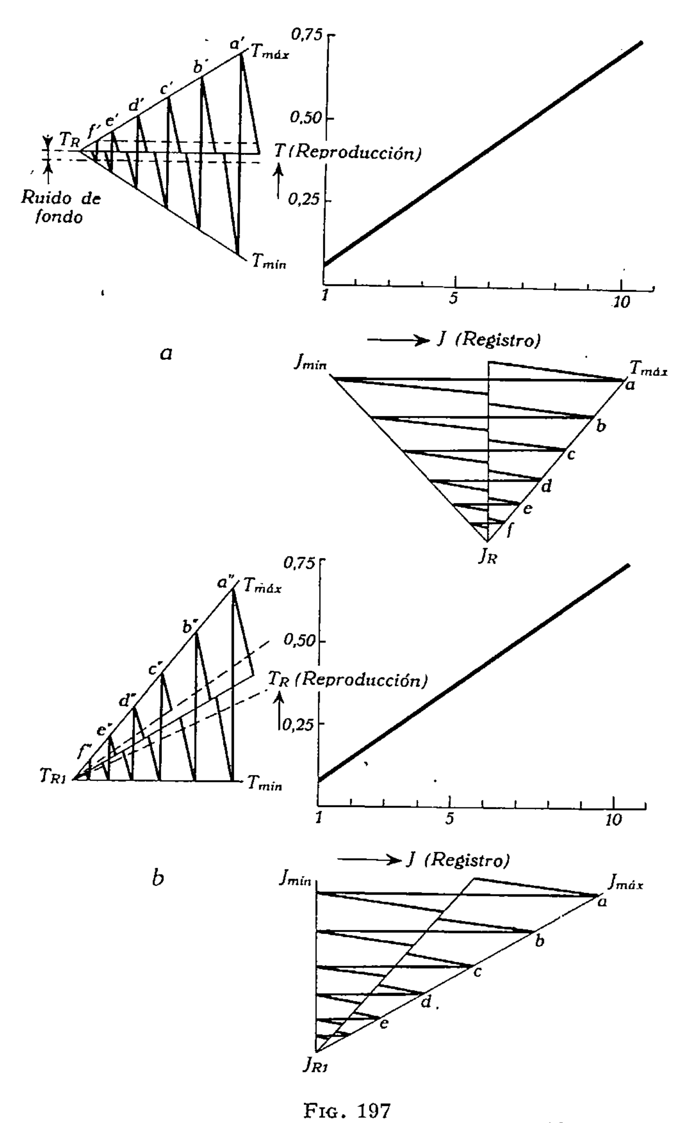


Fig. 197
a) Densidad variable sin reductor de ruido
b) Densidad variable con reducción de ruido

La reducción del nivel de ruido de fondo, y, con ello, el correlativo aumento de la latitud de volumen a partir de la figura 193, se puede calcular en decibelios, para lo cual basta tener de esta figura las ampli-

tudes del ruido de fondo correspondientes a las transparencias T_R y T_{R1} de la figura 197; así se tiene:

$$NR = 20 \log \frac{I_R}{T_{R1}} = \text{aumento latitud de volumen } L \text{ en dB};$$

por ejemplo: para $T_R = 0{,}019$ y $T_{R1} = 0{,}0035$, el aumento de latitud de volumen valdrá

$$\Delta L = 20 \log \frac{0{,}019}{0{,}0035} = 14{,}6 \text{ dB};$$

pero después de la relación que existe entre la densidad óptica y la transparencia $D = \log 1/T$, se puede expresar mí ; fácilmente el incremento en la latitud de volumen por:

$$\Delta L = 20\,(1{,}15 - 0{,}42) = 20\,(D_{R1} - D_R) = 14{,}6 \text{ dB};$$

por cada elevación de la densidad en 1,0 en el registro se obtiene un aumento de 20 dB en la latitud de volumen. Aquí, como en el caso de área variable, no entraremos en más detalles sobre los medios ideados para conseguir esa variación en la transparencia sin modulación, necesaria para la reducción del ruido de fondo, ya que esto corresponde más bien al estudio completo del *Registro de Sonido*, el cual acaso tenga su desarrollo adecuado en nuestra obra en preparación sobre el asunto; pero de momento, lo dicho es suficiente para darse cuenta de cómo puede lograrse en este sistema, a densidad variable, la reducción del ruido de fondo.

Nomenclatura sobre los tipos de registro de sonido. Después de las breves ideas sobre los dos sistemas de reducir el ruido de fondo y el consiguiente aumento en la latitud de volumen, que hemos dado para la mejor comprensión de cuanto sigue, vamos a dar la nomenclatura adoptada en América por la A. M. P. A. S., en noviembre de 1937, para designar los distintos tipos de registro puestos en práctica, que admiten equipos reductores y que ofrecen un aspecto visual muy distinto según dichos equipos, lo cual les da a cada uno características propias; dado que actualmente existen algunos equipos en América que emplean en la reproducción del sonido dos células fotoeléctricas, necesarias para sacar todo el partido que es posible de ciertos tipos de registro, y teniendo en cuenta que aunque algunos de tales registros pueden emplearse en los equipos ordinarios, en la postguerra seguramente se importarán en nuestro país equipos con cabeza de sonido para trabajo en *(push-pull)* contrafase con dos células, daremos la clasificación de aquella Academia en la siguiente forma:

Registros reproducibles con cabeza sonora normal:

a) Densidad variable, sencillo.
b) Densidad variable, aplastado *(Squeeze)*, sencillo.
c) Densidad variable, sencillo, doblemente aplastado.

d) Área variable unilateral.
e) Área variable bilateral.
f) Área variable duplex.

Registros sólo reproducibles con cabeza sonora en contrafase:

a) Densidad variable, en contrafase.
b) Densidad variable, en contrafase, aplastado.
c) Área variable, en contrafase.

Digamos, de paso, que los registros comprimidos o aplastados sólo pueden ser reproducidos sin deformación en aquellos equipos de teatro que tengan la potencia mínima requerida para tales registros, según veremos a su tiempo.

a) Es el representado en la figura 198; no es fácil apreciar a simple vista si se ha empleado o no el sistema reductor de que antes hemos hablado consistente en modificar la transparencia media al ritmo de la amplitud de modulación.

b) Es el correspondiente a la figura 199, y se conoce también con el nombre en inglés de *Squeeze* o *Matted track*. Sólo se aplica en densidad variable; es de los más modernos y se ha desarrollado teniendo en cuenta la necesidad de obtener una gran latitud de volumen equivalente o superior a la que se obtiene con los reproductores en contrafase, aun cuando sólo se utilicen los sistemas sencillos con una sola célula fotoeléctrica, que son los que abundan en la gran mayoría de los teatros. El incremento de latitud de volumen correlativo de la reducción de ruido se consigue aquí reduciendo el ancho de la banda sonora efectiva, y simultáneamente aumentando el porcentaje de modulación en aquellos pasajes en que el volumen de salida es mucho menor que el máximo, y se aplica primordialmente en escenas con conversación en voz baja o en silencio y con música de fondo a muy bajo nivel. La reducción del ancho de la banda se realiza, generalmente, al 25 ó al 50 % del ancho total, lo que da reducciones de ruido de 12 y 6 dB respectivamente. En este tipo de registro se precisa que la rendija óptica de exposición se encuentre uniformemente iluminada (1) a fin de que el aumento de modulación compense exactamente la reducción de la anchura de la banda, porque si no las partes comprimidas se reproducen a distintos niveles dependientes del grado de falta de uniformidad en la iluminación de la película. Para evitar o reducir en lo posible tal falta de uniformidad, se utiliza una doble compresión, en el centro y en los bordes de la banda sonora, y entonces se obtiene el registro (fig. 200) registro *c)*.

d) Es el registro R C A corriente de que ya hemos hablado (fig. 201); es fácil reconocer a ojo desnudo si el sistema lleva o no reductor de ruido de uno u otro de los dos tipos que indicamos ante-

(1) Véase nuestro trabajo citado sobre óptica del sonido, donde se estudia esta influencia.

riormente al tratar este aspecto de un modo general. Cuando se emplea el reductor de la figura 195 se puede presentar el inconveniente de que si la película tiene desplazamiento lateral en la apertura sonora del sistema reproductor, puede haber una deformación por quedar cortadas las crestas de bajo volumen fuera de la zona de exploración.



Fig. 198 Fig. 199 Fig. 200

e) Es el correspondiente a la figura 202, en el cual, además, se ha aplicado reductor de ruidos, que reduce la anchura transparente sin modulación, al mínimo posible; en la figura se aprecia bien la diferencia en este tipo de registro con y sin reductor de ruido. En él, la modulación es simétrica a lo largo de una línea ideal que pasa por el centro de la zona transparente, y se opera ya de por sí una reducción de ruido por ser esta zona más estrecha que en el caso de registro unilateral simple.

f) Corresponde a la figura 203 y es un registro inverso del anterior en el que la reducción de ruido de fondo en lugar de verificarse, como en aquél, en el centro, se realiza en los dos bordes de las partes transpa-

rentes. Algo semejante, y que a primera vista podría ser confundido con él, es el registro *doble bilateral*, primeramente empleado por la British Acoustic Gaumont, que sin reductor de ruido se da en la figura 204.

Al mismo tipo que el de la British pertenece el sistema de 14 registros bilaterales (fig. 205) de la película en Agfacolor La ciudad soñada,

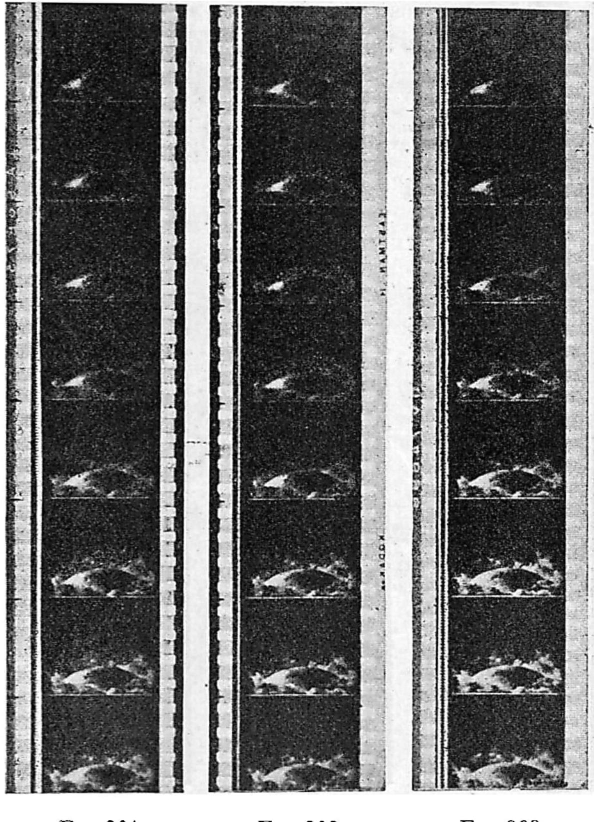


FIG. 201 FIG. 202 FIG. 203

utilizado por primera vez por Telefunken-Klangfilm, y el desarrollado en España por Lafon-Selgas, cuya principal ventaja parece ser la eliminación del inconveniente de la deformación, originada por la falta de uniformidad en la iluminación de la rendija óptica del reproductor, pero cuyo estudio cuantitativo no es fácil ni definitivo hasta el día (1).

Registros en contrafase. Como ya hemos indicado antes, con los tipos sencillos de registro, bien sea en área o densidad variable, sólo

(1) Véase IX Internationalen Kongress für Wissenschafliche und Angewandte Photographic, de París, 1935.

se logra una latitud de unos 40 dB a expensas de una gran deformación originada en el caso de densidad variable por la pequeña escala lineal que en las curvas de Hurter-Driffel existe en la zona de exposición normal, lo que limita el volumen o, cuando la señal es fuerte, en que se alcanzan las zonas no lineales, se provocan armónicos; otra causa de deformación es el sistema reductor de ruidos por su relativa lentitud de trabajo. En el caso de área variable, las causas de deformación son, esta última como para densidad variable, y el proceso de revelado y fijado y obtención de positivas.

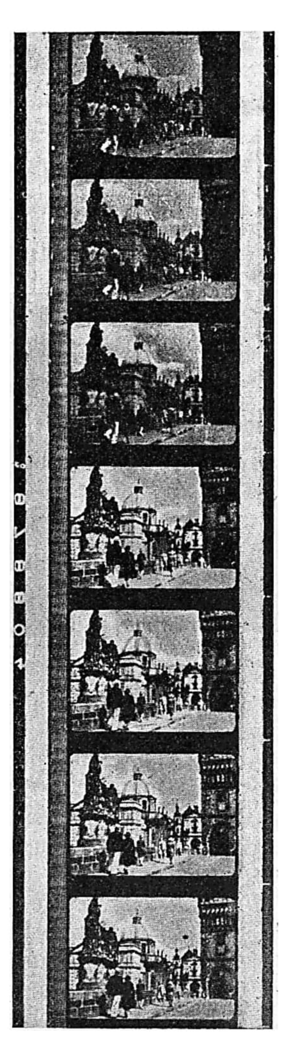


Fig. 205. Catorce registros bilaterales (Sistema Klangfilm)

Igual que en el caso de Radio (¹), aquí se ha acudido al sistema de utilizar dos registros en oposición de fase, que como en el caso de dos válvulas de radio, tiene la notable propiedad de cancelar todos los armónicos extraños pares que por aquellas causas de deformación se hubieran podido introducir como elementos deformantes. Tienen únicamente el inconveniente de que para su reproducción se requieren dos células fotoeléctricas conectadas con cuidado para que la señal sea reproducida en fase, y, por tanto, estos registros no pueden reproducirse en los equipos ordinarios con una sola célula fotoeléctrica, que son la mayoría de los actualmente existentes en España.



Fig. 204. Doble bilateral

Otra ventaja de los registros en contrafase es que las señales del sistema reductor de ruidos se registran *en fase* en la película y, por consiguiente, son cancelados en la reproducción, lo que permite un aumento en la velocidad de funcionamiento del sistema reductor, sin cortar las crestas de las señales registradas y, por tanto, sin deformar la señal registrada.

(¹) Véase la obra antes citada de S. Cordovés, o también nuestra obra *Equipos de baja frecuencia*, en preparación.

Como para las lámparas, existen tres clases de registro en contrafase: clase A (fig. 206), en que la mitad de la energía total de la señal se registra en media banda sonora y la otra mitad en oposición de fase en la otra media banda; clase B (fig. 206), en la que cada media banda sonora registra la energía de la señal según sea positiva o negativa, y clase AB, en cuyo registro las señales de volumen bajo se registran en clase A, mientras que las de gran volumen o superior a una cantidad prefijada se registran en clase B. De estos tres tipos de registro sólo el clase A se utiliza actualmente en la práctica, pues el clase AB está todavía reducido a trabajos experimentales y de laboratorio, y el clase B exige un equilibrio tan grande en los circuitos y características de las células de reproducción, que le hacen de valor práctico nulo; por ello, siempre que se habla de registro en contrafase se sobrentiende se trata de clase A. Naturalmente, este sistema de registro puede hacerse en los dos tipos área o densidad variable y puede o no estar dotado de sistema reductor de ruido.



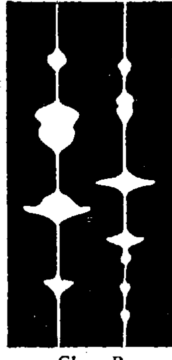


Fig. 206. Registros en contrafase

El tipo *a'* está representado por la figura 207; el *c'* en la figura 209, y, por último, en la figura 208 se ve un registro tipo *b'*, que en su parte superior es normal, en el centro lleva una compresión de 6 dB en cada registro o fase y en la parte inferior lleva un aplastamiento de 12 dB por fase.

Anchura del registro. Aun cuando, como hemos visto en la figura 182, la anchura normal primitiva de la banda sonora explorada en el sistema reproductor (imagen de la rendija óptica proyectada sobre la película en la cabeza sonora) es de 2,13 mm (0,084″), las necesidades del registro en contrafase han conducido al empleo de anchos más grandes en algunos casos, habiendo llegado los tres tipos de ancho normalizados en América, que se detallan en la figura 210. El primero tiene igual ancho en el registro ordinario de 0,076″ (1,93 mm) que en el registro normal en contrafase (1), pero con las dimensiones que se especifican en la figura. Necesidades posteriores de registro en contrafase han conducido a adoptar por los ocho mayores estudios americanos un tipo de registro en contrafase ancho de 0,200″ (5,08 mm), considerado también como *standard*, cuyas ventajas indudables pueden verse en

(1) Este ancho de 0,076″ todavía utilizado en 1938, ha sido reemplazado por el normal de 0,100″ (2,54 mm) en las películas americanas en 1944, y se conserva el de 0,200″ para el registro ancho en contrafase.

otro lugar [1] y que primordialmente se refieren a reducción de ruido de fondo y mejor aislamiento del *flutter* o modulación en frecuencia del sonido a 96 c/s, debido a los taladros de perforación de la película.



FIG. 207 FIG. 208 FIG. 209

Sincronismo de imagen y sonido. En los equipos reproductores de sonido, el sistema explorador de la banda sonora se encuentra debajo del proyector, y, por consiguiente, el sonido correspondiente a una imagen o cuadro que se está proyectando no se encuentra al lado de dicho cuadro, sino adelantando (con respecto al sentido de movimiento de la película, que pasa con las imágenes invertidas por delante de la ventanilla de proyección) una cantidad constante, que se ha fijado en 19 cuadros y $^1/_3$ de cuadro; esto quiere decir, que la distancia entre el eje de proyección en el crono y el eje de sonido en la cabeza sonora debe quedar determinada por la condición de que si la película se

(1) Véase nuestra obra *Curso de cine sonoro (II Registro)*, complemento de la presente obra, en preparación.

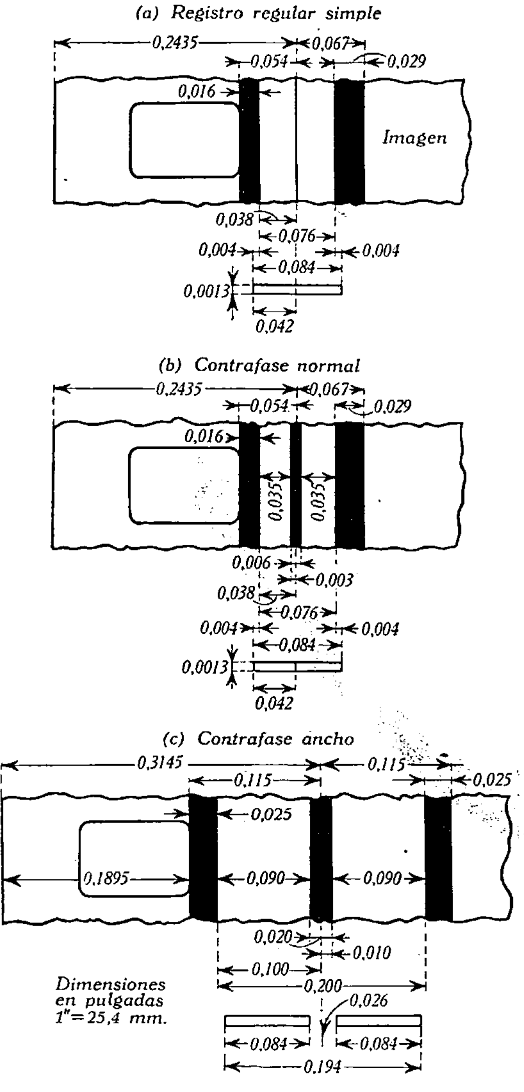


FIG. 210. Todas las dimensiones en fracciones de pulgada = 25,4 mm.

mueve uniformemente en ambas ventanillas, dicha distancia contada sobre la película (y no verticalmente entre ambos ejes) corresponda precisamente a esos 19 cuadros y $^1/_3$. Esto lleva consigo dos limitaciones: una, relativa a la distancia vertical entre dichos ejes, que debe ser menor para permitir a la película el cambio entre el movimiento intermitente que tiene en el crono y el uniforme que debe llevar en la cabeza de sonido, cambio que debe efectuarse sin tirones, porque de otro modo se traducirían en deformaciones del sonido.

Por otra parte, se han de dejar los bucles necesarios para que la película sea bien recogida por el sistema de arrastre de ambas cabezas de proyección y sonido y que no se transmitan a través de dichos bucles las vibraciones de la película originadas por el mecanismo intermitente del crono, a la parte situada en la ventanilla de sonido, para evitar la causa de deformación de que antes hemos hablado. Dado que estos bucles los forma el operador al montar la película en el equipo reproductor del sonido, conviene poner especial cuidado en mantener dicha distancia contada sobre la película, si no se quiere obtener en la proyección un efecto de retraso o adelanto entre los movimientos que producen los sonidos y la audición de los mismos (1). Un ejemplo

(1) Para la observación del sincronismo es conveniente situarse en el centro de la sala, pues si ésta es larga y no se ocupa tal posición, interviene el tiempo de propagación del sonido en la sala, a razón de 340 m/segundo. En los proyectores Century los bucles quedan hechos automáticamente al montar la película y no hay posibilidad de falta de sincronización entre sonido e imagen.

permitirá darse fácilmente cuenta de ello: supongamos que la distancia en la película entre aquellos ejes por elegir los bucles demasiado grandes (o eventualmente por un mal acoplamiento entre crono y cabeza sonora), es de 25 cuadros en lugar de los 19 que con gran aproximación pueden admitirse como normales; puesto que la película camina a razón de 24 cuadros por segundo, el sonido correspondiente a un cuadro que se encuentra en la ventanilla de proyección no pasa en ese momento por la ventanilla de sonido, sino después de un cierto tiempo, que es el que emplean los $25 - 19 = 6$ cuadros de diferencia, en alcanzar dicha ventanilla de sonido. Pero como cada cuadro precisa para pasar por una ventanilla $^1/_{24}$ de segundo, los 6 cuadros emplearán $6 \cdot {^1/_{24}} = {^1/_4}$ segundo, que será el tiempo de retraso del sonido con respecto a la «acción» que se realiza en la pantalla, y el espectador verá, por ejemplo, un golpe de martillo y al cabo de $^1/_4$ de segundo escuchará el golpe correspondiente. Cuando, por el contrario, la distancia contada sobre la película sea menor que los 19 cuadros, el sonido será percibido antes que la acción sobre la pantalla; es decir, el sonido estará adelantado. Aquel valor preciso es el que con toda exactitud debería guardarse, pero nuestra experiencia nos permite asegurar que salvo en locales de extraordinaria longitud, se puede tolerar hasta separaciones de unos 21 a 22 cuadros, sin que el espectador perciba diferencia alguna de falta de sincronización.

XII. Características de los sistemas y reproductor de banda

Idea de un sistema reproductor y sus características primordiales

Hasta ahora sólo nos hemos ocupado, salvo unas ligeras cuestiones que rozan el asunto al tratar de la película (Capítulo XI), de la parte del equipo reproductor que se refiere a la proyección de la imagen sobre la pantalla, que constituye la primera gran etapa histórica en el desarrollo de la Cinematografía. La segunda gran etapa la constituye todo lo relativo a la reproducción del sonido, sin lo que hoy día el *cine* no es concebible como espectáculo; el origen de la cual es relativamente reciente, pues data de los confines del año 1930 su introducción en nuestro país.

Aun cuando inicialmente la reproducción del sonido se hacía mediante discos gramofónicos sincronizados con la imagen, muy pronto se utilizó el registro en la misma película, y hoy es el único tipo empleado, razón por la cual sólo de esta clase de reproductores nos vamos a ocupar.

Esquemáticamente, todos los sistemas hoy en uso están constituídos por un *lector o cabeza de sonido*, en el que las distintas transparencias de la banda sonora registrada en la película se traducen en impulsos o variaciones de tension eléctrica; de un *sistema amplificador*, que recoge esas variaciones de tensión amplificándolas y elevándolas a un nivel suficiente para producir variaciones correlativas de corriente, en el paso final del sistema amplificador o paso de potencia, capaces de excitar suficientemente un sistema de reproductores de sonido propiamente dichos o *sistema de altavoces;* y de este sistema de altavoces, que traducen esas variaciones de corriente eléctrica en ondas sonoras que se difunden por toda la sala, a través de la pantalla. Como elemento auxiliar primordial conviene destacar el *Fader* o *atenuador principal*, cuya misión es reducir convencionalmente y a voluntad el nivel de aquellas variaciones de tensión ajustándolo al valor preciso, con el fin de que el sonido emitido por el sistema de altavoces en el local adquiera el nivel sonoro adecuado

a la escena que se proyecta y en consonancia con la absorción en la sala y la escena representada en la pantalla, evitando al mismo tiempo una sobrecarga en los altavoces que, además de poder llegar a deteriorarlos, produzca deformaciones en el sonido. Todo cuanto digamos en lo sucesivo tiende a la más perfecta coordinación de esos elementos, a partir del estudio de sus características, con la única finalidad de reproducir el sonido registrado en la película con la mayor naturalidad posible, de modo que el espectador adquiera la mayor sensación de realismo de la escena que se representa en la pantalla.

Desde los comienzos, la evolución de estos sistemas reproductores ha sido rapidísima y paralela a la correlativa en el registro, marcando una era decisiva en este progreso el año 1933 con la presencia en el mercado de dos sistemas: *Wide Range* (1), de Western Electric, que reparte la gama de frecuencias a reproducir en tres *canales*, cada uno conectado a un tipo especialmente adaptado de altavoz, y el *High Fidelity*, de la Radio Corporation of America (R. C. A.), que, finalmente, y siguiendo los pasos de Western, acaba por adoptar la subdivisión de la gama de frecuencias en dos canales *(two-way)*, hoy aceptada casi con exclusión de las demás.

Los tres aspectos fundamentales considerados a lo largo de la evolución de los sistemas, que tienen una repercusión profunda en el *standard* de la reproducción son:

a) Aumento de la plena potencia del amplificador, lograda sólo modernamente, con margen suficiente para manejar los registros de sonido con gran latitud de volumen.

b) Adopción de un sistema de altavoces, u otro diseño de tipo eléctrico en conexión con aquél, que permita extender la gama de frecuencias a reproducir, con la menor deformación o máxima fidelidad posible.

c) Un diseño progresivo en la cabeza de sonido, que permita eliminar prácticamente o reducir el *flutter* o modulación en frecuencia (MF), que en las mismas se origina por el arrastre de la película, y que contribuye a una nueva causa de deformación del sonido reproducido.

El primer aspecto sólo se ha resuelto para las necesidades prácticas de los locales, hace relativamente poco tiempo; en cuanto al segundo adoptado, el sistema de «dos canales», se ha tomado como frecuencia límite entre ambos la de 300 c/s, comprendiendo dos gamas, entre 30 y 300 c/s la una, y 300 y 8000 c/s la otra, cuya separación se logra mediante filtros o redes, de los que más adelante hablaremos, y, por último, la reducción de la MF ha podido alcanzar en los equipos Western, desarrollados en el transcurso de la guerra pasada, valores tan pequeños como el 0,08 %, muy inferior al que después indicamos en las

---

(1) Un sistema amplificador se llama de banda ancha cuando la relación del ancho de la banda transmitida a la frecuencia del centro de la banda es un número mayor que 1; y esto se realiza en el caso de Western, que abarca 50 a 8000 c/s; de aquí el nombre de *Wide Range*.

especificaciones de la A. M. P. A. S., (1) lo que prácticamente equivale a su anulación.

Como hemos dicho, estas tres directrices en el progreso de los equipos son las que han guiado a los técnicos en su evolución, pero no son las únicas características a tener en cuenta en la calidad de un equipo; las características del local, la imposibilidad de obtener una linearidad perfecta a lo largo de toda la gama de frecuencias a reproducir, las propiedades direccionales de los sistemas de altavoces, especialmente en las altas frecuencias, así como las grandes latitudes de volumen de los modernos registros *Hi-Range*, que alcanzan valores de 60 dB, son, para no citar más que las más importantes, otros tantos factores a tener en cuenta, y ante la dificultad de satisfacer a todos de un modo completo, teóricamente se ha llegado, como siempre, a establecer, para los sistemas comerciales de calidad, ciertas tolerancias o desviaciones de aquellas características de perfección ideal que se podrían suponer cuando todas esas desviaciones fueran nulas. Tales tolerancias, que si son satisfechas acreditan un equipo como de primera calidad, se encuentran contenidas en las siguientes especificaciones dadas por la A. M. P. A. S. en marzo de 1936:

Respuesta total en frecuencias. El sistema no deberá desviarse en $\pm$ 2 dB entre los 50 y los 8000 c/s, sobre el ángulo entero de distribución, dentro de los 3 m (10′) de la embocadura de la bocina.

Gran rendimiento electroacústico. Deberá aproximarse al 50 %, con el fin de que la potencia del amplificador no sea excesivamente grande.

Variación o latitud de volumen. Deberá ser al menos de 50, y preferiblemente de 60 dB.

Ausencia de deformación de «transitorios» y «rasgueo» (fuzziness). El traductor electroacústico (receptor) debe ser de tal naturaleza que no engendre armónicos perjudiciales en las crestas de la plena potencia (2), y el defasaje entre las distintas unidades que forman el sistema reproductor propiamente dicho (altavoces o receptores), debe ser tal que el sonido sea equivalente al que procede de un solo foco de sonido.

Característica de distribución angular. El sonido debe radiarse dentro de un ángulo horizontal de al menos 110° y uno vertical de 60°, con una respuesta aproximadamente uniforme en todas las posiciones.

Potencia plena del amplificador. Deberá ser tal que se pueda radiar un vatio acústico (3) por cada 30,5 m² (1000 pies²) de superficie medida en el suelo, cuando la sala está ajustada para el tiempo óptimo de reverberación (véase Capítulo XX).

(1) Academia de Ciencias y Artes Cinematográficas de Hollywood.

(2) Véase nuestro trabajo: *Realimentación negativa y características compuestas*, donde se estudia este caso de un modo elemental.

(3) Los vatios acústicos se miden a partir de las variaciones de presión del aire engendradas por el sonido en un punto de la sala; es decir, dan la medida de la energía del campo sonoro en ese punto.

Reducción del flutter en la cabeza sonora. Además de las anteriores características se precisa que el paso de la película no engendre en la cabeza sonora una MF superior al 0,15 % y preferiblemente al 0,01 %. Aunque unos pocos tipos satisfacen a esta condición (Western y R.C.A.), la gran mayoría de los tipos comerciales no cumplen con este requisito.

Peso reducido, equipo manejable y coste razonable. Un sistema que esté dentro o exceda estas especificaciones, puede considerarse satisfactorio comercialmente.

De todos estos aspectos nos iremos ocupando en detalle a medida que estudiemos los distintos elementos componentes del sistema, pero de momento y como base de un estudio general de los sistemas reproductores de sonido, vamos a hacer algunas observaciones sobre tres aspectos de entre los antes mencionados: gama de frecuencias, potencia eléctrica del sistema amplificador y latitud de volumen del equipo.

Banda de frecuencias. Es un hecho bien conocido que muy pocos altavoces son capaces de reproducir fielmente una gama de frecuencias tan amplia como las que antes hemos indicado, siendo ésta la razón fundamental de la adopción del sistema de dos canales, ya que la necesidad de tal gama es ineludible para una buena reproducción. La conveniencia de extender esa gama viene determinada por la ganancia en naturalidad obtenida con tal extensión, frente al crecimiento correlativo de ruidos y sonidos extraños, que lleva consigo tal extensión. En el estado actual de la técnica del registro, se precisa como mínimo una característica plana hasta los 6000 c/s para estar en consonancia con el registro en la película; pero una extensión hasta los 7 u 8000 c/s es quizá la más adecuada, sin que sea, hoy por hoy, aconsejable una extensión más allá de los 8000 c/s, pues ésta adquiere cada vez menos valor debido a la decreciente sensibilidad del oído a tales frecuencias, tal como hicimos ver en el Capítulo X, a la pequeña cantidad de energía de los sonidos a reproducir en esta región, y especialmente a que, por encima de los 8000 c/s, los ruidos, la MF de la cabeza sonora y los armónicos debidos a la deficiencia del registro y la intermodulación en los receptores determinan una limitación de gran importancia. Es por eso también que casi todos los sistemas actuales de garantía en registro llevan un filtro de «paso bajo» con frecuencia de corte de 8000 c/s, para que por encima de ella no haya nada en el registro que pueda ser reproducido, y mantener el equilibrio aural.

En estrecha relación con este aspecto de la banda de frecuencias se encuentra la cuestión económica, muy importante en sistemas comerciales y con menos valor en equipos experimentales o de laboratorio.

La reproducción de música es quizá la más crítica aplicación de los altavoces, debido a la anchura de la banda y las potencias cubiertas por varios instrumentos, la necesidad de baja deformación y la importancia de la distribución espacial del sonido reproducido. Conviene

hacer notar que un alto grado de sonido que satisfaga totalmente al oído del espectador, sólo se obtiene de sistemas que estén muy cerca de las ideas teóricas a este respecto.

Como es hoy técnicamente posible lograr grandes mejoras en el comportamiento general de los sistemas, la cuestión que se plantea es determinar en qué medida es ventajoso aprovechar esos avances y en qué extensión deben aplicarse a los sistemas en sus condiciones medias de utilización.

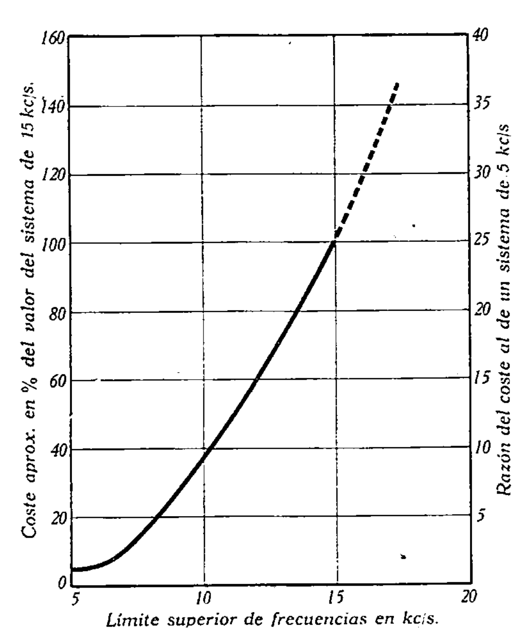


FIG. 211. Coste relativo de los componentes electroacústicos y asociados de un sistema reproductor de sonido

Nuestro problema se reduce a completar el sistema de transmisión incluyendo el oído del que escucha, de modo que se pueda especificar un sistema de reproducción que transmita la banda total *útil* de frecuencias y potencias, pero no sufra el aspecto económico impuesto por aquel diseño. Alguna idea de la importancia de la estimación cuidadosa del gasto requerido para cada banda de frecuencias se ve en la figura 211; por encima de los 5 ó 6 kc se hace imperativo subdividir la banda y utilizar un número de reproductores con sus redes divisoras de frecuencias, a fin de mantener la eficiencia y mejor distribución espacial del sonido, sobre la banda total prescrita en el espectro de frecuencias. Evidentemente, esta curva será escalonada con cada adicional reproductor mediante un pequeño trazo vertical, y, evidentemente, la frecuencia inferior y capacidad de potencia afectan también al precio, pero para ver la marcha hemos tomado valores medios, con lo que es fácil darse una idea de aquel aspecto.

Una vez fijado el límite superior de la gama, el inferior queda automáticamente definido, pues se ha encontrado que, prácticamente, el producto de ambas frecuencias extremas para un equilibrio ideal, debe ser aproximadamente 500 000, de modo que para $f_s = 8000$, será $f_i = 60$ c/s aproximadamente. (Véase Equilibrio aural).

Potencia del sistema. La potencia eléctrica modulada del sistema amplificador de un equipo reproductor, ha ido creciendo constantemen-

te en consonancia con la capacidad de los locales dedicados a teatros y cinemas y con las mayores latitudes del registro en la película que sucesivamente se han logrado; inicialmente se consideró suficiente para la mayoría de los locales existentes una potencia de salida que oscilaba entre 2,5 a 12 W, lo que representa un nivel máximo de salida de

$$10 \cdot \log \frac{12}{0{,}006} = 33 \text{ dB}$$

(se toma, como es costumbre, como nivel de referencia el de 0,006 W); así, por ejemplo, el equipo Western 3 S 46, de servicio en muchos locales de España desde hace más de doce años, posee una potencia máxima de 1,5 W, lo que representa $10 \log \frac{1{,}5}{0{,}006} = 24$ dB, mientras que el equipo dotado de amplificador de potencia 43 A, destinado a grandes locales, posee una potencia de 9,5 W, lo que representa un nivel de

$$10 \log \frac{9{,}5}{0{,}006} = 32 \text{ dB.}$$

Locales cada vez mayores condujeron a un aumento de 3 a 6 dB, lo que produce un nivel de salida máximo de unos 40 dB, y, en algunos casos, se estimó necesario llegar hasta los 50 dB; pero han sido precisamente los registros actuales Hi-Range y en contrafase (con sus grandes latitudes de volumen que alcanzan los 60 dB, y en los que efectos sonoros como gritos, terremotos, cañonazos, etc., que exigen niveles fisiológicos de sensación considerablemente más elevados que los que se podían obtener anteriormente con niveles de hasta 80 dB por encima del umbral de audición) los que han llevado a los técnicos del sonido a no admitir un nivel máximo de salida, inferior a los 90 phons (véase Capítulo X). Se comprende ahora por qué la cifra antes especificada de un vatio acústico por cada 305 m² de superficie, está plenamente justificada; de una parte, para estar en consonancia con el moderno desarrollo en la técnica del registro y de otra para tener en cuenta el rendimiento electroacústico de los altavoces con sus bocinas, baffles, etc.

Latitud de volumen del sistema. Como ya hemos visto antes, no es otra cosa que la conocida relación señal-ruido, tan utilizada en las emisiones transatlánticas de radio expresada en decibelios (véase Capítulo XI). Para teatros de primera categoría, esa latitud definida para el sistema reproductor de sonido no debe ser inferior a los 60 dB, lo que significa que el ruido residual del sistema sin modulación debe tener al menos un nivel de 60 dB por debajo del máximo nivel sin deformación (o con una deformación inferior al 2 %), modulado el amplificador a plena potencia. Así, por ejemplo, en el amplificador 46 Western a que antes nos hemos referido, el nivel de ruido del sistema deberá ser igual o menor de 24 — 60 = — 33 dB, mientras que para el 43 *A*, dicho nivel será también igual o menor de 32 — 60 = — 28 dB; se comprende, pues,

que, manejando esa misma latitud de 60 dB, el nivel de ruidos debe reducirse proporcionalmente en la medida de su potencia, y que, por

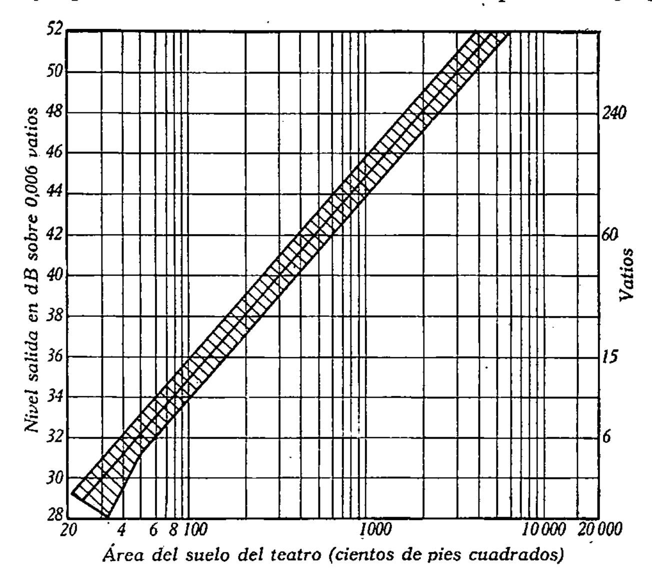


FIG. 212. Potencia de salida en vatios eléctricos, recomendable en función de la superficie en pies cuadrados (1' = 30,5 cm.)

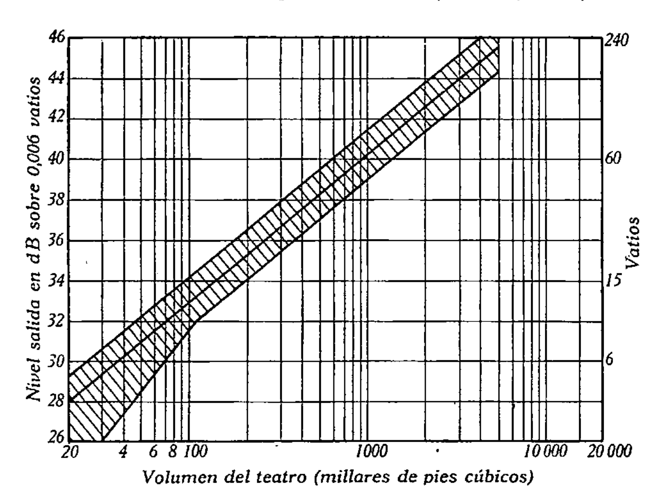


FIG. 213. Potencia de salida en vatios eléctricos en función del volumen del teatro en pies cúbicos

consiguiente, las dificultades para lograrlo son tanto mayores cuanto menor sea ésta. Como resultado de cuanto llevamos dicho se han construído las curvas de las figuras 212, 213 y 214, que presentan en forma

de áreas rayadas la potencia (entre dos límites) que se precisa para un teatro cuando se conoce, bien sea su superficie, volumen o número de asientos; todas ellas tienen igual precisión y permiten determinar la potencia del amplificador a instalar en un teatro, para lograr una

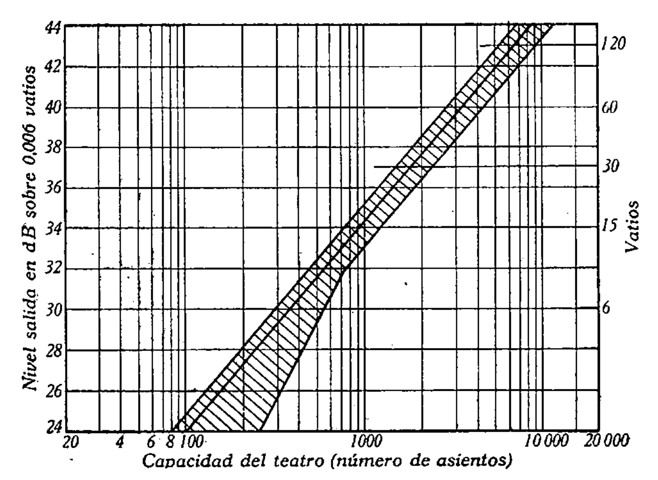


FIG. 214. Potencia de salida en vatios eléctricos en función de la capacidad de asientos

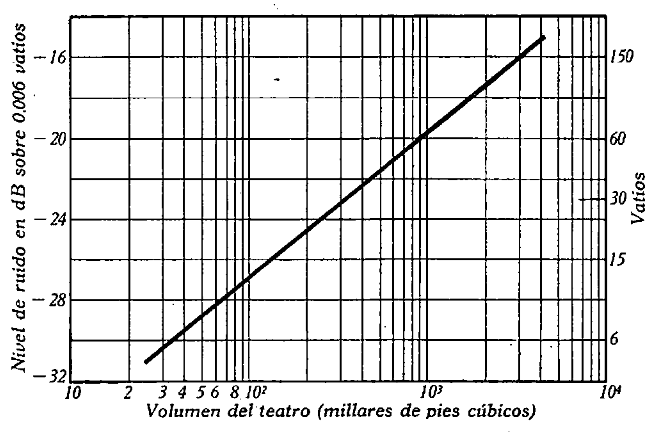


FIG. 215. Máximo nivel de ruido aceptable, basado en el nivel de salida, recomendado en la figura 213 (curva de la figura 215 + 60 dB = curva figura 213)

calidad en el sonido reproducido. Como quiera que esta potencia es función de la absorción y reverberación en la sala, se comprende por qué se da en forma de área, con dos topes para aquella potencia, los cuales dependen de la desviación del mejor tiempo de reverberación, mientras que la recta media representa la potencia estricta para ese tiempo óptimo.

En la figura 215, se muestra el nivel de ruido aceptable para sistemas instalados de acuerdo con las recomendaciones de la figura 213; por último, la figura 216 da el tiempo óptimo de reverberación a la frecuencia de 512 c/s (véase Capítulo XXI) para teatros de varios volú-

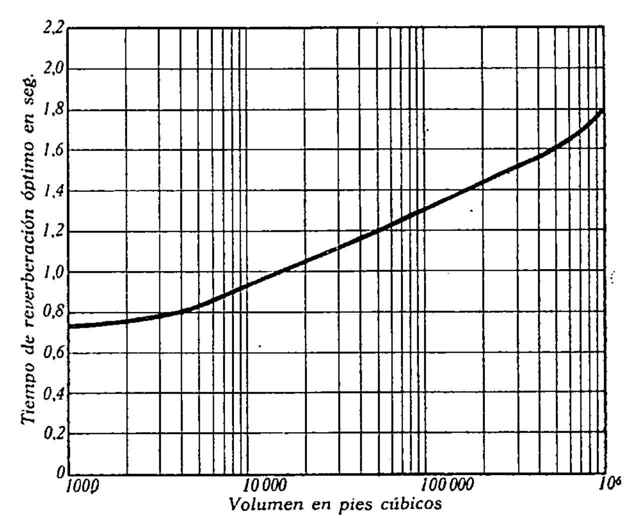


FIG. 216. Tiempo óptimo de reverberación en función del volumen, para 512 c/s.

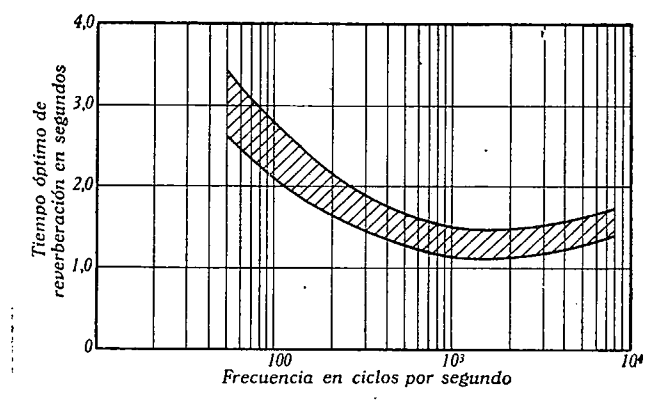


FIG. 217. Óptima reverberación para diferentes frecuencias en un local de $3{,}10^5$ pies cúbicos de capacidad

menes, según la figura 213, mientras que la figura 217 muestra cómo varía ese tiempo óptimo con la frecuencia incluída en los registros de sonido, para un local de 300 000 pies^3, o sea unos 30 500 m^3.

Otro método para aumentar la variación de volumen manejable con el equipo aun cuando éste no tenga latitud de volumen tan grande como la especificada anteriormente, pero sí la potencia sufi-

ciente, consiste en utilizar los registros Hi-Range, o aplastados, de que ya hemos hablado y en los que el ruido de fondo del registro se reduce disminuyendo el ancho normal de la banda y aumentando simultáneamente el porcentaje de modulación en aquellos pasajes en los que el nivel a reproducir es considerablemente menor que el correspondiente a la potencia máxima del amplificador; de este modo, la latitud de volumen en el registro relativa a esas señales débiles, queda aumentada y, por tanto, pueden incluirse tales señales en el intervalo de variación o latitud de volumen del amplificador sin el peligro de

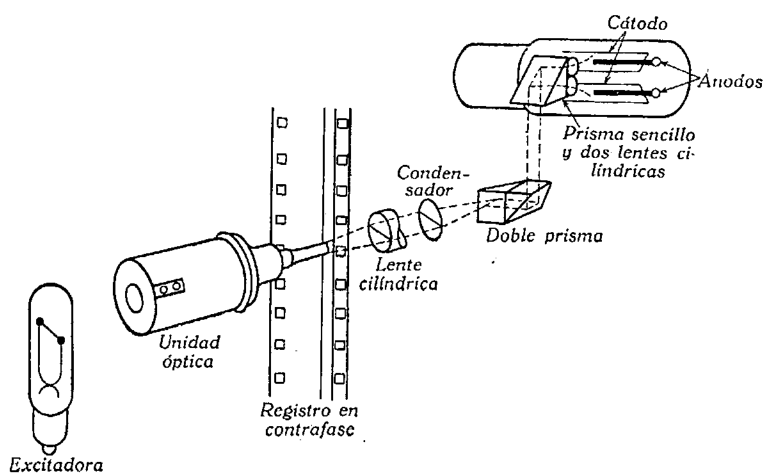


FIG. 218. Sistema R. C. A. para registro en contrafase

que aparezca amplificado el ruido de fondo del registro. Estas películas deben reproducirse según las indicaciones del estudio indicadas en las colas de la misma, que generalmente consisten en colocar el Fader para el volumen propio del diálogo, y automáticamente se reproducen al volumen adecuado aquellos pasajes a que antes hemos hecho referencia, pues si se reduce su volumen a un nivel inferior al que se ha creado en el momento del registro, resultará el diálogo demasiado bajo para una buena reproducción; se requiere, además, en estos registros una distribución uniforme de sonido en todo el teatro, y como la latitud de estos registros, incluído el incremento con la compresión, viene a ser de unos 50 dB, todos los pasajes de la película pueden reproducirse con bastante naturalidad.

El reproductor de banda sonora

Después de haber dado las características generales de un equipo reproductor de sonido, incumbe ahora estudiar, cada uno y por separado, los elementos fundamentales que lo integran, y para ello vamos a comenzar por el más típico y característico de todos ellos,

el *reproductor de banda, cabeza* o *lector de sonido* (que todos estos nombres recibe), pues los que le siguen no son esencialmente distintos de los empleados corrientemente en la técnica de la Radio, aunque tengan características especiales.

Existen actualmente dos tipos generales de cabezas sonoras: uno normal, con una sola célula fotoeléctrica (CFE) para la reproducción

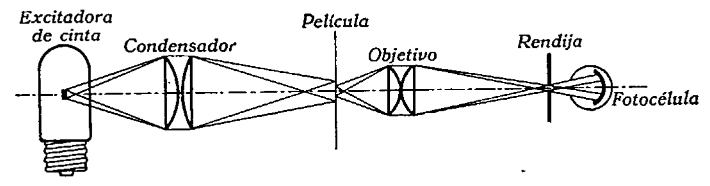


FIG. 219 *a*. Sistema Western. El enfoque de la excitadora se hace un poco antes de la película. Exploración posterior. TA-7400

de los registros corrientes, y otro de doble célula que es apto para reproducir los registros en contrafase; este último lleva siempre un conmutador que permite poner las dos células en paralelo para la reproducción normal; en la figura 218 se representa esquemáticamente la cabeza MI-1070 de R. C. A. Atendiendo al a forma de exploración de la banda sonora, pueden ser de dos tipos: los de proyección directa o *exploración anterior,* como el representado en la figura 219 *b*, y los de proyección indirecta o *exploración posterior,* adoptada en los últi-

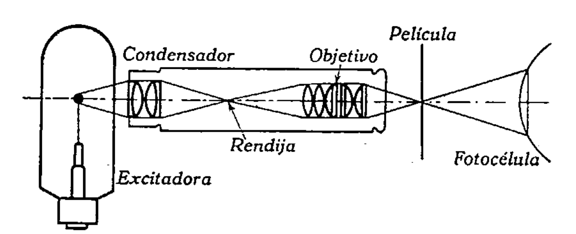


FIG. 219 *b*. Sistema Western. Exploración anterior

mos modelos por Western, como el representado en la misma figura 219 *a*; éste es muy semejante al empleado en el caso de registro Western ordinario, especialmente en cuanto a la óptica se refiere, y ambos tipos sólo se diferencian esencialmente en la permutación de las posiciones relativas de la película y la rendija mecánica (1).

En cualquier tipo de cabeza existen los siguientes elementos: *a)* un foco de luz, formado por una *lámpara excitadora,* cuyos rayos actúan como verdaderos *portadores* o vehículo de la energía sonora; *b)* un

(1) El sistema es muy semejante a una lámpara de tres electrodos; la excitadora representa el cátodo, la banda sonora de la película, la rejilla, y la célula equivale al circuito de placa de aquella lámpara-tríodo; el flujo de luz, reemplaza al de electrones.

sistema óptico más o menos complicado, dentro del cual incluímos una *rendija mecánica (slit)* de bordes agudos y paralelos, que limita el haz

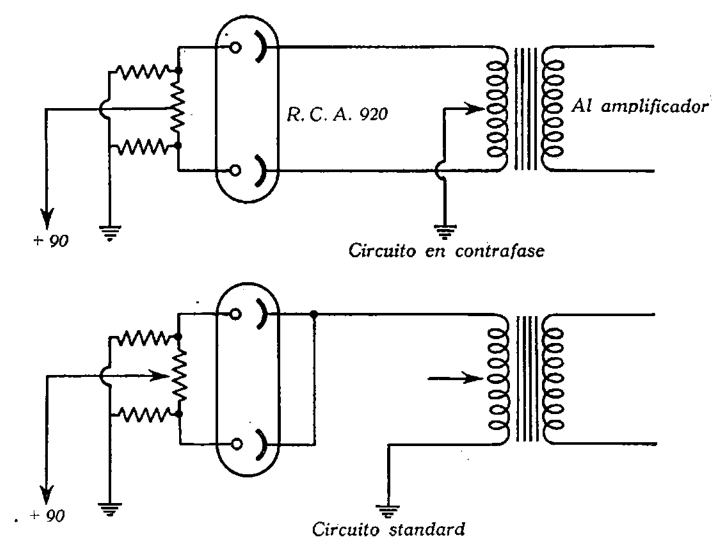


FIG. 219 *c*. Esquema del sistema de conexiones para los dos tipos de registro con la fotocélula R. C. A. 920

de luz; *c)* un *sistema de progresión* o arrastre de la película, cuya banda sonora actúa como *control* o mando de la energía sonora incidente en la célula, y *d)* una o dos células fotoeléctricas, según el tipo de registro a reproducir, que traducen esas variaciones de luz gobernadas por la película, en variaciones de tensión eléctrica. Las figuras 219 *c* y 219 *d* dan esquemáticamente la manera de transformar una cabeza sonora apta para reproducción de registro en contrafase, en otra para registro sencillo; como se ve, se ponen las dos células en paralelo.

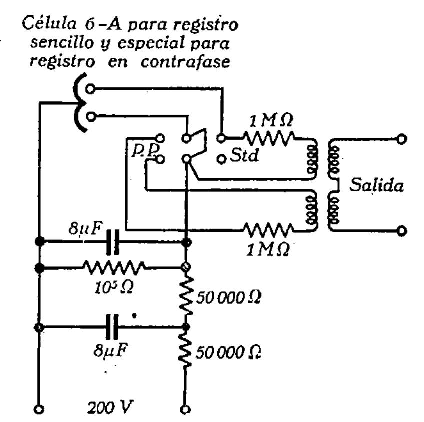


FIG. 219 *d*. Esquema del reproductor Western TA 7400

a) Excitadora

Puede suceder que la propia naturaleza del trabajo imponga una limitación en la densidad del foco de luz, cual sucede algunas veces en el caso del registro de sonido, o, por el contrario, y éste es el que más nos interesa, que no sólo no haya limitación, sino que nos convenga

tener la mayor densidad posible de luz. En efecto, el flujo de luz que incide en el sistema óptico, según vimos en el Capítulo I, al dar unas ideas de Fotometría, sólo depende de la abertura del ángulo sólido de vértice en el filamento de la excitadora y base en el condensador del sistema óptico, de la distancia de la excitadora a dicho sistema óptico y de la densidad de luz o brillo del filamento; los dos primeros factores están limitados por las dimensiones físicas de la cabeza sonora, que no pueden ser muy excesivas, pues de otro modo ocuparían gran espacio, y por la abertura relativa del sistema óptico, y manteniendo ambos constantes, conviene que el brillo sea lo mayor posible a fin de que para grandes densidades de la banda sonora, incida luz suficiente en la célula para seguir las modulaciones de aquella banda. Esta cantidad de luz, cuando la rendija óptica que se forma en la película está interceptada por una película de transparencia media y sin modulación, depende, pues, de la excitadora y del sistema óptico, cuyas lentes, como vimos, absorben una cierta cantidad de aquel flujo, que suele oscilar entre 5 y 20 mililúmenes. De otra parte, veremos después el interés que tiene obtener en el foco o filamento de esta excitadora un brillo o densidad de luz lo más homogéneo posible, pues una falta de uniformidad en ésta a lo largo de las dimensiones del filamento se traducen en una deformación en el sonido, especialmente en los registros que hemos denominado *aplastados.*

Deben construirse, pues, las excitadoras teniendo en cuenta todos estos factores, y suelen ser lámparas de filamento incandescente, perfectamente rectilíneo, procurando que mantengan esta forma el mayor tiempo posible, pues con las horas de trabajo existe una tendencia a curvarse, cayendo de la parte central, lo que viene a originar una causa de deformación en el sonido equivalente a la anterior por falta de homogeneidad en la luz que alcanza la banda sonora. Para exploración indirecta, las excitadoras son de filamento de cinta, y tanto de unas como de otras se debe conocer su *temperatura de color* (véase Capítulo I), para las condiciones normales de trabajo, siendo ésta su característica más esencial.

Lo mismo que dijimos al hablar de las lámparas de proyección y por iguales razones, muchas excitadoras se construyen con el filamento arrollado en hélice de paso muy fino, para lo cual su construcción se realiza bajo miscroscopio con aumentos de hasta 80 diámetros, única manera de lograr un paso uniforme que contribuya a mantener aquel brillo homogéneo a lo largo de toda su longitud; tales excitadoras sólo pueden emplearse en los sistemas de exploración directa o anterior, pues en los de proyección indirecta la excitadora debe ser de filamento de *cinta* a fin de obtener una densidad de luz más uniforme; cuando se enfoca una excitadora del primer tipo se busca siempre aquella región de la hélice en la que la distribución de espiras es más igual. La característica flujo en lúmenes frente a tensión aplicada, debe ser lo menos inclinada que se pueda a fin de que las variaciones de tensión tengan la menor influencia posible en la reproducción del so-

nido, empleándose, en algunos casos, estabilizadores de voltaje. Siempre que lo permita las excitadoras deben alimentarse con corriente continua, pero en caso de hacerlo con corriente alterna, ésta debe filtrarse suficientemente hasta que el porcentaje de *rizado* (1) sea prácticamente nulo, pues de otra manera, la modulación del flujo de luz que tal ondulación de corriente produce, sería suficiente para producir un zumbido en el sonido superpuesto al sonido registrado. Sus tensiones de trabajo varían entre 5 y 10 V, mientras que los consumos oscilan entre 1,5 y 8 A. Finalmente, han de ser muy antimicrofónicas, es decir, insensibles a las vibraciones, para evitar otra clase de ruidos parásitos en la reproducción.

b) Sistema óptico

La observación de la figura 219 muestra que en ambos casos el sistema óptico está formado por un condensador y un objetivo el cual forma una imagen óptica de la rendija mecánica (exploración directa), sobre la película, a la cual se le llama rendija óptica; o bien (exploración indirecta) una imagen óptica del área explorada, sobre la rendija mecánica, que en este caso limita el haz de luz; los otros elementos que se observan en la figura 218 sólo tienen como finalidad una colimación, es decir, producir rayos paralelos, y el doble juego de prismas producir una desviación de la imagen para que incida en forma adecuada en las dos células fotoeléctricas. Todos estos elementos son, pues, secundarios, y los verdaderos componentes del sistema óptico de reproducción son: el *condensador* y el *objetivo*, la *rendija mecánica* y la *rendija óptica;* es de ellos de los que nos vamos a ocupar, y a su conjunto se le suele llamar *apertura de sonido*, estando sus posiciones relativas determinadas por la excitadora, la célula fotoeléctrica y el sistema de progresión de la película.

Rendija óptica y deformaciones que produce. No es éste lugar para hacer un estudio de las condiciones exigibles a ella, pero sí podemos dar las conclusiones finales. Digamos, en primer lugar, que la anchura de la misma tiene un efecto muy marcado tanto en la reproducción como en el registro; se comprende, que si tal anchura es muy grande, las variaciones de flujo de luz para un registro de sonido sinusoidal puro, que por transparencia pasan a través de la zona de banda cubierta por la rendija óptica, y supuesta constante la velocidad de progresión de la película, serán tanto menores cuanto mayor sea el número de variaciones registradas por metro en la película, es decir, cuanto mayor sea la frecuencia del sonido, y, por tanto, las frecuen-

(1) Se entiende por tal la relación de la tensión alterna de cresta residual a la tensión continua expresada en %. A veces, como sucede en algunos equipos R. C. A. se alimentan los excitadores con corriente alterna procedente de un oscilador de frecuencia inaudible y entonces no se prensa filtro alguno.

cias altas se perderán si damos a la anchura un valor demasiado grande; tampoco podremos hacerla excesivamente estrecha para atenuar tal deformación, pues aparte de las dificultades técnicas de construcción y de que el menor residuo de polvo podría originar una pérdida de homogeneidad en el flujo de luz que atraviesa la película, este flujo

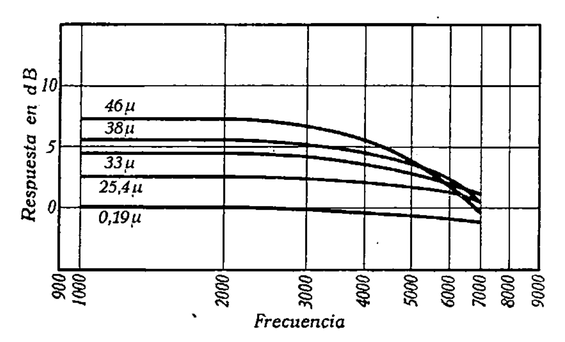


Fig. 220. Respuesta a frecuencias para varios anchos de rendija

sería suficientemente pequeño para que su influencia en la célula fotoeléctrica cayera fuera de los límites de sensibilidad de la misma, la cual necesita un mínimo de lúmenes para dar lugar a una corriente determinada; en resumen: *el ancho de la rendija origina una pérdida a medida que crece la frecuencia del sonido registrado*, y la figura 220 nos da estas pérdidas para diferentes anchos y frecuencias. Para com-

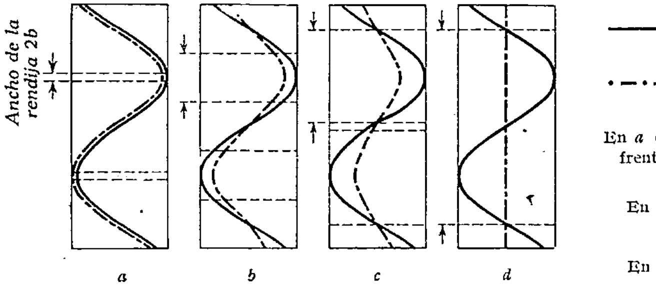


Fig. 221. Influjo de la anchura *2 b* de la rendija en la reproducción de frecuencias

paginar ambos defectos se ha adoptado como tipo o standard una rendija óptica de 0,032 por 2,13 mm (0,0013″ por 0,084″), o sea 32 μ de ancho (¹).

A medida que aumenta la frecuencia del sonido registrado y para una anchura dada, decrece la amplitud de variación de la luz trans-

(¹) Una micra vale 0,001 mm y se representa por la letra μ.

mitida a la célula a través de la banda sonora, y *esa intensidad es nula para una frecuencia de corte tal que la anchura de la rendija es igual a media longitud de onda, contada sobre el registro en la película* (¹); así, por ejemplo, para el ancho standard:

$$0{,}032 = \frac{\lambda}{2} \quad ,, \quad \lambda = 0{,}064 \text{ mm};$$

pero puesto que, según veremos, la película se mueve a razón de 456 milímetros por segundo, la frecuencia de corte, o sea, el número de longitudes de onda contenidas en esos 456 mm, valdrá

$$\frac{456}{0{,}064} = 7125 \text{ c/s.}$$

Fig. 222. Influencia de la inclinación

Una extrapolación en la figura 220 nos haría ver que a esa frecuencia, la curva correspondiente a aquella anchura alcanza a la horizontal de nivel cero decibelios precisamente a tal frecuencia. Estas pérdidas, a medida que crece la frecuencia, conviene tenerlas muy en cuenta cuando se efectúan las pruebas de transmisión de un equipo sonoro, así como también las que se originan en el registro (²), pues sólo así es posible obtener una respuesta sensiblemente horizontal.

Otra causa de deformación del sonido en la reproducción es la inclinación de la rendija de reproducción respecto a la del registro, las cuales deben ser siempre normales a la dirección de progresión de la película; en este caso, el factor de deformación es distinto según el tipo de registro de que se trate; para el caso de densidad variable, un ángulo de inclinación de 0,5° entre las estriaciones del registro y la rendija de reproducción da para la frecuencia de 10 000 c/s una pérdida de luz de un 35%, equivalente a unos 9,2 dB, que representa algo perfectamente perceptible al oído. La figura 222 da la deformación para el caso de área variable, con distintos ángulos y para una rendija de 30 μ.

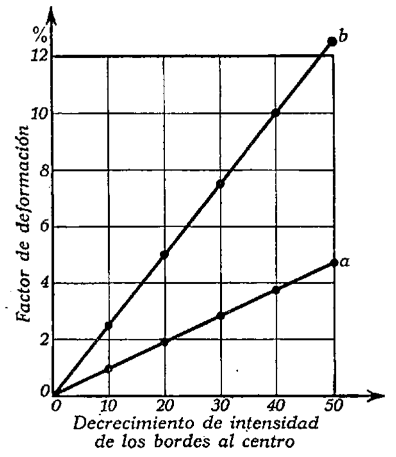


Fig. 223. Influencia de iluminación no uniforme

Finalmente, una falta de homogeneidad en la iluminación de la rendija provoca otra causa de deformación del sonido reproducido, como muestran las curvas *a* y *b* de la figura 223, en la primera de las

(¹) En la figura 221 se ve esta limitación de un modo intuitivo.
(²) Véase nuestra obra *Curso de cine sonoro (II Registro).*

cuales se supone una distribución parabólica de la luz en la rendija del centro a los extremos, mientras que en la segunda la distribución de luz es lineal de un extremo al otro.

Microobjetivos. Una vez fijadas las dimensiones de la rendija óptica, estamos en situación de poder estudiar las condiciones que deben reunir los elementos propiamente ópticos del sistema, así como la rendija mecánica, para lo cual será conveniente tener en la mente las ideas que de aberraciones y abertura dimos al tratar de los objetivos de proyección, y como quiera que la gran mayoría de los objetivos empleados en registro y reproducción (salvo algunos de tipo fotográfico empleados en registro con aberturas de $\frac{f}{1,4}$ y 20 mm de foco) son objetivos de microscopio, daremos unas ideas sobre éstos.

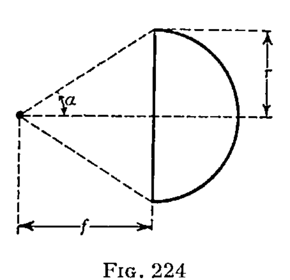


FIG. 224

Para esta clase de objetivos se define la *apertura numérica*, como el producto $n' \cdot \text{sen}\, \alpha$ (fig. 224), en la que n' representa el índice del medio interpuesto entre el objeto y su lente frontal, que en nuestro caso vale 1, y α es el ángulo señalado en la figura. Existe una relación muy sencilla entre la apertura numérica y la abertura relativa para los objetivos de proyección, ya que siendo α en éstos relativamente pequeño, se puede poner:

$$A.N = n' \cdot \text{sen}\, \alpha \simeq \frac{r}{f} = \frac{D}{2f} = \frac{1}{2n}, \text{ con } n = \frac{f}{D}$$

y, por consiguiente, un objetivo de abertura $\frac{f}{n}$ tiene una $A.N = \frac{f}{2n}$.

Para los microobjetivos, α puede llegar a valer hasta 70° en algunos *apocromáticos* [1], con lo que $AN = 0{,}94$, pero para los fines de reproducción sonora bastan aperturas numéricas que oscilen entre 0,4 a 0,65.

La construcción y precio de estos objetivos depende principalmente de su apertura numérica, y las condiciones restantes a que tiene que satisfacer son menos rigurosas en muchos aspectos que los objetivos de proyección, dado que en la reproducción sonora el objeto al reproducir es de forma conocida, siempre la misma, y algunos defectos de la imagen, como el de curvatura y deformación, pueden orillarse dando una forma adecuada al objeto, ya que como tal funciona la rendija mecánica; no debe perderse de vista, sin embargo, que en nuestro caso el objetivo funciona en sentido inverso del microscopio. Cuando la apertura numérica es del orden de 0,1 o menor, están constituídos por una lente doble o triple, pegadas todas o sólo dos, y se le

---

(1) Corregidos de acromatismo para tres colores.

imponen las siguientes condiciones, además de fijar la distancia focal: supresión de la aberración esférica, de la aberración cromática, y condición de aplanetismo para que la imagen no tenga corona o penacho y la imagen sea muy neta. Objetivos con tan pequeña apertura numérica son insuficientes para la reproducción sonora, por su pequeño poder de resolución, lo que impide separar sonidos registrados en la banda sonora que estén más apretados que tal poder de resolución; así sabemos que tal poder viene dado por

$$P = \frac{0{,}61 \times \lambda}{AN} = \frac{0{,}61 \times \lambda}{n' \operatorname{sen} \alpha}$$

y aquí, poniendo $AN = 0{,}10$ y $\lambda = 0{,}0005$ mm como valor medio de la longitud de onda de la luz empleada, se obtiene $P = 0{,}000305$ mm. Suponiendo registrado un sonido puro cuya frecuencia acústica sea ν y para la velocidad normal de la película de 456 mm segundo, la distancia entre dos máximos en la película para que sean *percibidos* como separados por el objetivo, tiene que ser igual o mayor que el valor del poder separador, es decir:

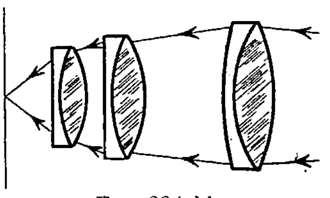
$$\frac{456}{\nu} > 0{,}000305$$

lo que da $\nu < 15\,000$ c/s; esto quiere decir que todas las frecuencias superiores no son separadas por el objetivo, y éste no reproduce tales frecuencias; existe, pues, un tope mínimo para la apertura numérica. Es verdad que el cálculo anterior nos ha dado una resultdo superior al que se exige en los actuales reproductores, cuya frecuencia superior es de 8000 c/s, pero no debe perderse de vista que, según vimos al tratar de la película, existe un ensanchamiento en la película de las partes oscuras causado por la falta de viveza en la emulsión (fig. 193); es decir, las partes oscuras se ensanchan, y *son éstas en definitiva las que limitan el poder separador*, ya que esa separación de los máximos que corresponden a los 15 000 c/s es mayor que la encontrada en la práctica, y de aquí que se precisen aperturas algo mayores [1]. De otra parte, aperturas tan pequeñas reducen grandemente, según vimos, el flujo efectivo de luz que atraviesa el objetivo, con la consiguiente pérdida de volumen en todas las frecuencias. En definitiva, se precisan aperturas que oscilan entre los valores antes señalados, con lo que, además de obtener mayor flujo de luz y, por tanto, una respuesta más elevada a igualdad de las demás condiciones, se eleva esa frecuencia de corte motivada por el poder separador. Tales objetivos suelen estar constituídos por dos o tres lentes acromáticas, de las cuales la frontal es planoconvexa

---

[1] Aun cuando en razón de ello y según el cálculo anterior, la apertura numérica podría reducirse, quedaría reducido notablemente el flujo de luz que incide en la película, lo que es de importancia capital y el factor decisivo en el tope del valor de dicha apertura numérica.

(fig. 224 bis); con una subcorrección esférica de aberración que corresponde a la posición de la película; dado que ésta es en realidad una lámina planoparalela, se comprende que no sea indiferente el colocar o no la gelatina del lado del objetivo [1]. Digamos, por último, que el hecho de no tener estos objetivos corrección de curvatura de la imagen ha conducido a dar a la rendija mecánica la curvatura adecuada para que su imagen sea plana; tal es el caso de los sistemas Western empleados hace varios años y construídos por Beck y Bausch & Lomb.


FIG. 224 bis

Condiciones generales del sistema óptico. Los sistemas ópticos de reproducción y muchos de registro suelen estar constituídos por un sistema condensador acromático formado generalmente por dos lentes planoconvexas, el cual concentra la luz procedente de un foco en una rendija de metal o cuarzo y cuya imagen, a su vez, el objetivo, va a colocar en la película; cuando se trata de reproducción no se necesita que el condensador sea acromático.

Veamos las condiciones de posición y foco que deben reunir en conjunto estos elementos, que suelen ir montados en un solo tubo en los equipos de reproducción. La cosa será mucho más fácil imaginando de primera intención (fig. 225) que el sistema total es simétrico, aun cuando los razonamientos que siguen nos muestran que no siempre ello es forzoso.

En tal sistema, las lentes sencillas que hemos dibujado en M y K serán en principio dos microobjetivos constituídos como el de la figura 224. El foco de luz Q dará su imagen a través de K en la pantalla real S que forma la rendija mecánica, y M formará de la rendija de S y de la imagen en ella formada, otra imagen sobre la película, con lo que la imagen se obtendrá en B. Podemos ahora concebir M y K como un solo sistema óptico que forma la imagen de Q en B, y como consecuencia de la simetría del sistema y de la marcha de sus rayos, el aumento lateral necesariamente será 1. Si invertimos la marcha de los rayos de modo que el objeto ahora sea B, su imagen Q tendrá las mismas dimensiones que B, y como para los sistemas usuales de registro B tiene $0{,}0025 \times 3$ mm éstas serán las dimensiones de Q.

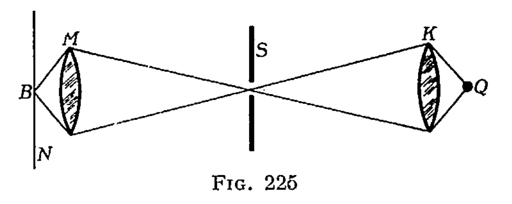


FIG. 225

¿Qué nos enseña esta inversión de rayos? En primer lugar, con tal sistema será suficiente un foco de luz que tenga aquellas dimen-

[1] La gelatina va siempre mirando al objetivo para evitar la falta de homogeneidad en el grueso de película, y el consiguiente desenfoque.

siones, y si empleáramos focos más extensos, sólo una zona de él de 0,0025 × 3 mm sería útil, perdiéndose el resto.

Caben ahora dos posibilidades en cuanto al foco de luz, según que nos encontremos limitados o no en la elección de éste; o bien tomamos un foco de luz constituído por un filamento recto de 0,0025 mm de grueso o bien elegimos libremente un foco de luz intenso como, por ejemplo, una lámpara de incandescencia; para los sistemas de reproducción sonora no hay limitación alguna, pero sí en los sistemas de registro, cuando se emplean lámparas de descarga luminescentes (*flashing valves* o *glimm röhren*).

Refiriéndonos a las lámparas de filamento incandescente, debe tenerse presente que con filamentos gruesos se obtiene una densidad de luz superior a la de los finos, y de aquí que las excitadoras tengan un filamento muy rico, pero arrollado en hélice de paso muy corto que le da aspecto de un filamento grueso. Pero la intensidad de iluminación es, como sabemos, únicamente *dependiente de la densidad de luz y de la apertura*, y, por consiguiente, cuando sea libre la elección del foco, deberemos elegir aquel que tenga mayor densidad de luz; podremos, pues, obtener una mayor intensidad de iluminación con un foco de luz de aquellas dimensiones especificadas y gran densidad de luz, que con otro de dimensiones más extensas, pero de menor densidad, siempre, claro está, bajo la hipótesis que el aumento del sistema valga uno.

Por otra parte, puesto que en los sistemas de reproducción podemos elegir libremente el foco de luz y, según acabamos de ver, es la densidad del foco lo que importa (siempre que tengan aquellas dimensiones mínimas de 0,0025 × 3 mm), seleccionaremos las excitadoras que tengan mayor aquélla y al mismo tiempo que sean lo más homogéneas posible, es decir, que sobre superficies de esas dimensiones, la densidad sea lo más constante posible. Esto es lo que hacen los técnicos cuando van a enfocar, buscando aquella región del filamento en que además de no estar curvada la hélice que forma, las espiras están regularmente separadas. Pero como además la técnica actual permite fabricar regularmente excitadoras de una gran densidad, podremos, a expensas de esta densidad, *elegir el sistema condensador con menor apertura*, con el fin de que en lugar de ser un microobjetivo siempre caro y bastante difícil de construir e improvisar, sea un sistema óptico más barato, lo que desde el punto de vista comercial tiene mucho valor.

Pero esta disminución de la apertura del condensador, como consecuencia de la libre elección del foco de luz, o, por mejor decir, de la producción actual de excitadoras de gran densidad, modifica en principio la constitución del sistema óptico de la figura 225. Su resultado es que el foco Q se separa de K más que lo está B de M y, por consiguiente, el aumento *lateral del sistema M-K no puede ser igual a uno.*

Aparte de esto, la simplicidad y baratura relativa de las excitadoras da incluso a éstas dimensiones muy superiores a las especificadas anteriormente. Pero tales focos forzosamente no pueden ser homogé-

neos en todas sus partes, y aunque así fuera al poco tiempo de uso dejan de serlo; es decir, la densidad de luz de tales focos varía de unos puntos a otros de su superficie, y, por tanto, no será aconsejable, como en la figura 225, colocar directamente su imagen en S y B, porque entonces tanto S como B estarán desigualmente iluminados, lo que ya vimos al principio de este artículo produce deformación en la reproducción del sonido. En tales casos será preferible alejar todo lo posible de S y B la imagen de Q, es decir, llevarla al infinito, lo que ciertamente es posible. Basta situar el objeto en el foco o muy cerca de él, para obtener la imagen en el infinito o bastante alejada del sistema para que se pueda admitir tal hipótesis; empleando lenguaje de la óptica: *conviene trabajar siempre en luz paralela,* cosa bien conocida de todo el que haya trabajado con goniómetros o espectrógrafos.

En la figura 226 se ha representado un sistema de tal tipo, en el cual se han logrado ambas variantes de la figura 225; —condensador de

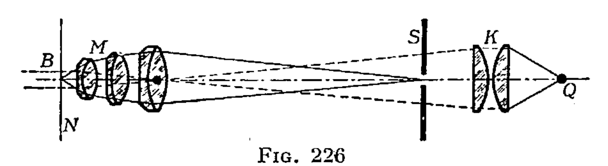


FIG. 226

pequeña apertura y alejamiento de la imagen—. Aquí, en oposición a la figura 225, se han dibujado separadamente la marcha de los rayos de luz de la rendija y del foco. El foco de luz Q —marcha de los rayos en puntos— da, mediante el condensador K, una imagen en el centro óptico de la tercera lente de M, punto que coincide sensiblemente con el foco de todo el sistema M, y este sistema vuelve a dar de dicha imagen otra en el infinito. La marcha de los rayos de S —marcada en trazo continuo— no se separa sensiblemente de la señalada en la figura 225, salvo que aquí el sistema M está constituído, como vimos en la figura 224, para formar un microobjetivo. Resumiendo todos estos resultados, podemos decir que cuando se disponga libremente de focos de luz, *se deben preferir aquellos que tengan mayor densidad de luz, teniendo menor valor la forma y magnitud del foco; por otra parte, en razón del menor gasto, el condensador debe ser sencillo y de pequeña abertura relativa, y, por último, con objeto de tener una iluminación homogénea de la rendija mecánica y de su imagen, la del foco debe situarse lo más lejos posible de la rendija.* Este tipo se presenta en el caso de la reproducción; veamos ahora el del registro. Entonces, por el contrario, muchas veces nos vemos obligados a emplear un foco de luz determinado, cuya densidad de luz no podemos aumentar y es relativamente pequeña (AEO Light lamps, Zetka, Rayteon, etc.) y cuyas dimensiones aproximadas son las propias de la rendija antes especificadas o ligeramente superiores; pero cuya densidad es sensiblemente uniforme; en tales casos, podremos elegir el sistema de la figura 225 o bien prescindir por completo del sistema condensador.

Tal caso es el representado en las figuras 227 *a* y *b*, con las mismas observaciones respecto a *M* que en la referencia anterior (¹): en *a)* se muestra un corte a lo largo de la rendija, mientras que en *b)* el corte es normal a dicha dirección. La lámpara estará en su verdadera posición cuando la marcha de *todo* rayo que pase por un punto dentro del diafragma iris de *M* y por uno cualquiera de la rendija mecánica, encuentre al foco de luz; en estas condiciones se obtiene el mayor aprovechamiento del flujo de luz, y no tiene ventaja el empleo de condensador.

Todos los sistemas detallados anteriormente se diferencian únicamente en el método de iluminación, mientras que la manera de obtener la imagen de la rendija es siempre la misma, consistente en emplear un microobjetivo cuyo aumento varía entre 1 y 20, y que *según la densidad del foco posee una apertura más o menos grande.* Resulta de aquí que los objetivos empleados para registro con lámparas de descarga luminescente cuya densidad es relativamente pequeña, son en general más caros, por la naturaleza especial de sus vidrios, y por ser más costosos de construir debido a su mayor apertura.

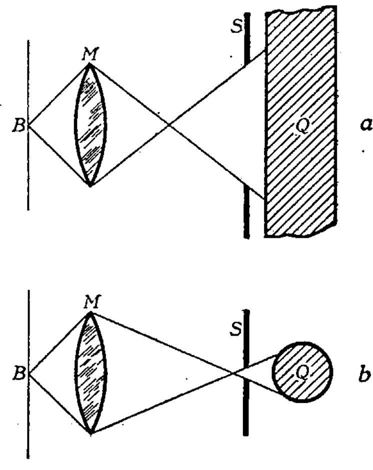


FIG. 227

Dimensiones físicas del sistema óptico. Un aspecto muy interesante para el constructor es, sin duda, la longitud del tubo que contiene el sistema de objetivo, rendija y condensador y dimensión total desde la excitadora hasta la ventanilla de sonido, en los sistemas de reproducción. Desde el punto de vista óptico, hay dos formas de modificar el aumento lateral del sistema. El uno consiste en situar el objeto (figs. 228 *a* y *b*) más o menos cerca del foco *F*; cuanto más cerca esté de este foco, tanto mayor será su imagen y tanto más lejos se situará ésta del sistema. Se observa, además, por comparación de *a* y *b*, que el aumento lateral del sistema se eleva a medida que se acorta la distancia focal, lo que nos da el segundo método de modificar el aumento, lográndose, además, que las imágenes estén más cerca.

Si quisiéramos diseñar un sistema óptico cualquiera que tenga un aumento lateral predeterminado, por ejemplo 20, tendremos en alternativa, o elegir la distancia focal relativamente grande, y con ello también grande la distancia entre objeto e imagen, o, por el contrario,

(¹) La firma americana Bausch & Lomb construye unos objetivos especiales en cuanto al vidrio que lo forman, llamado *optex glass*, que tiene una absorción por transmisión muy pequeña en la región ultravioleta, especialmente en la región de las 3800 U. A. de máxima sensibilidad de la película de registro.

un foco corto y también corta la separación entre objeto e imagen. Si, por otra parte, el constructor debe conservar un determinado flujo de luz para el sistema, y, por consiguiente, una determinada abertura relativa, entonces, para el sistema de mayor distancia focal, debe prever un diámetro de abertura mayor que para el de menor distancia focal, en virtud de la propia definición de abertura relativa.

Estos problemas se presentan en la construcción y diseño de sistemas ópticos para cine sonoro; considerando, por ejemplo, la figura 226, *S* será el objeto y *B* la imagen, con lo que unido al aumento dado también de antemano, habremos de determinar la distancia focal;

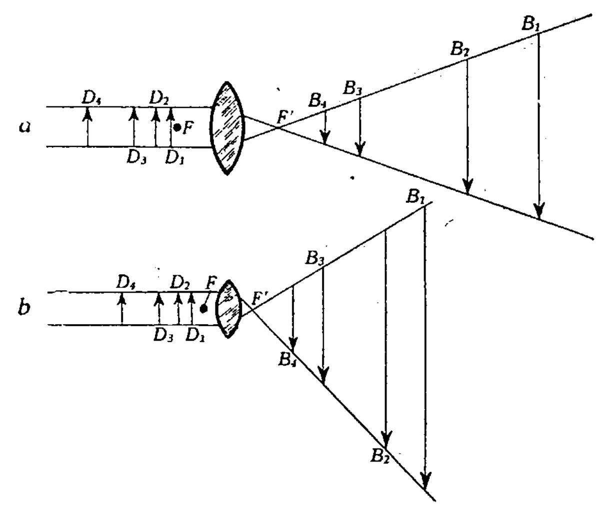


FIG. 228

la cual será tanto más pequeña cuanto menor sea la distancia entre *S* y *B*. Al diseñar el sistema se deberá elegir la distancia entre *S* y *B* lo más pequeña posible, porque así la longitud física del tubo que lo contiene será también muy corta, y correlativamente pediremos al fabricante de objetivos uno de posible distancia focal corta. Pero, evidentemente, éste tendrá que sujetarse a límites estrechos al reducir la distancia focal, porque el número de lentes aumenta al acortar el foco, y para un flujo de luz dado, cada lente, o conjunto de lentes pegadas, absorbe el 10 % de luz. Entonces para la solución del problema fundamental, imagen de la rendija muy clara, de bordes bien netos, y reducida de tamaño por el valor del aumento, deberá emplear el número de lentes estrictamente indispensables. Esos límites serán más amplios si disponemos de flujo suficiente para poder emplear una lente adicional. Para sistemas de reproducción sonora es muy conveniente reducir todo lo posible la longitud del tubo, pues se dispone de focos suficientemente densos, pero para sistemas de registro que

utilizan lámparas luminescentes, de poca densidad en general, es preferible reducir la pérdida de luz a un mínimo, y para ello aumentar la longitud física del tubo ([1]).

c) Sistema de progresión de la película

Existen esencialmente dos tipos de progresión de la película por delante de la apertura de sonido: uno que podemos llamar de *ventanilla*, del que un modelo muy avanzado está representado en la figura 229, utilizado aún en España en los equipos Western por dificul-

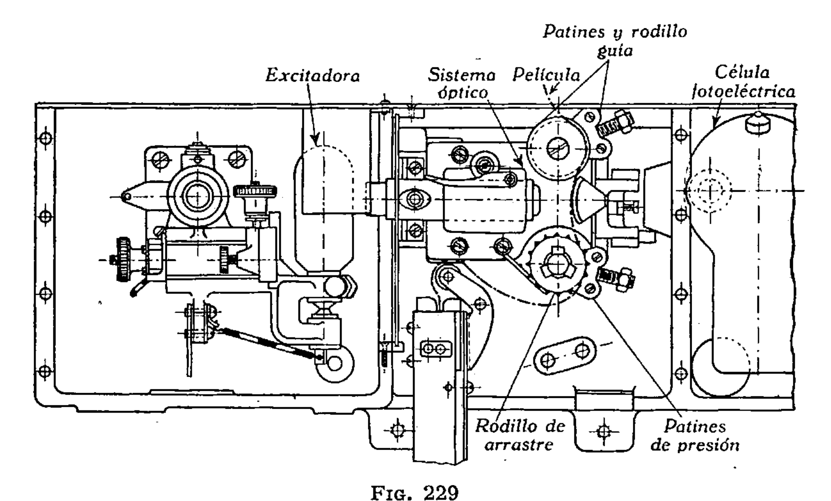


Fig. 229

tades de importación, y, otro que llamaremos de *tambor cinético*, esquematizado en la figura 230, también correspondiente a uno de los equipos modernos de la misma firma, aunque no el último ([2]). Como se observa en la primera figura, la película, después de salir del sistema intermitente del proyector, es recogida entre un tambor pequeño —que gira libremente sobre su eje, y que tiene como única misión guiar la película y evitar que se transmitan a lo largo de la misma los empujes del sistema intermitente juntamente con un bucle que delante de él debe formar la película— y unos patines de presión que sujetan la película sobre dicho tambor o rodillo-guía; la película pasa por delante de un sector circular en el que se encuentra la abertura por donde pasa

([1]) El contenido de estos tres últimos párrafos está tomado de nuestro trabajo: *La óptica del sonido y la proyección en cinematografía*, aparecido en «Metalurgía y Electricidad», 1945, junio y siguientes.

([2]) El más moderno y que reúne indudables ventajas sobre los dos anteriores, hasta el punto de haberlos reemplazado definitivamente, es el representado más adelante en las figuras 242 *a* y 242 *b*.

la luz procedente del sistema óptico, después de atravesar la película, a la célula situada a la derecha de dicha pieza circular, y es recogida después por un rodillo con dientes y un sistema de patines idéntico al del rodillo-guía, los cuales mantienen la película contra el rodillo de dientes o rodillo de arrastre; es este rodillo el que tira de la película, y ésta, por la tensión desarrollada en virtud de la forma especial de su recorrido, se mantiene contra la pieza circular que antes hemos descrito, con lo cual no hay posibilidad de desenfoque de la banda. Detrás del rodillo de arrastre, la película penetra en unas guías y va a otro rodillo de arrastre dentado, pero cuya misión es ahora impedir que la tensión de la película, procedente de la bobinadora del tambor donde se va almacenando la película, se transmita al rodillo de arrastre propiamente dicho, lo que produciría, como vamos a ver, deformaciones en el sonido.

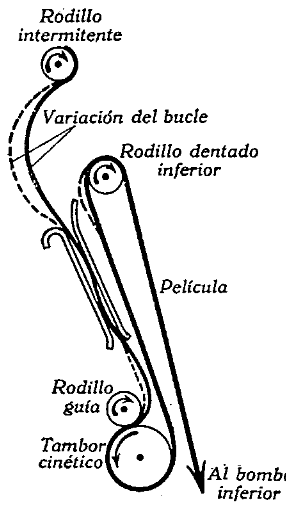


FIG. 230
Arrastre mediante tambor cinético

En el sistema de tambor, como se ve en la figura 230, la trayectoria de la película es muy distinta, y lo que le caracteriza es que la pieza circular del sistema anterior, que era fija, está reemplazada aquí por un *tambor cinético de exploración*, o tambor de impedancia mecánica que, como su nombre indica, posee una gran cantidad de energía cinética cuando es puesto en movimiento por el mismo efecto que antes de la tensión de la película, siguiendo a aquélla y logrando que la marcha de la misma no experimente ningún cambio impulsivo o periódico en su velocidad. Este tambor lleva también una abertura por donde penetra la luz después de atravesar la banda de la película, y mediante un prisma de reflexión total, la rendija óptica es desviada a la célula. Aquí se han suprimido los patines de antes, cuya misión realiza ahora, conjuntamente con la suya propia, el rodillo-guía situado sobre el tambor cinético, y el rodillo de arrastre de la parte inferior de antes, se encuentra ahora situado más arriba y en una posición determinada por definidas relaciones en la trayectoria de la película de que hablaremos más adelante y que tienden a evitar variación de tensiones en la misma que se propagarían al tambor cinético. La característica esencial de este tambor cinético es la de estar movido únicamente por el contacto con la película, y llevar un *estabilizador rotatorio*, del que describiremos después su misión. La cualidad común de ambos sistemas de arrastre es evitar en la medida posible que se transmitan a la parte de película que está siendo explorada cualquier variación impulsiva o periódica de su velocidad, y en qué medida esto se consigue mejor con el segundo sistema, será el objeto de este párrafo.

d) Necesidad de una velocidad determinada y permanente

Recordemos que al hablar del sincronismo entre imagen y sonido dijimos que era necesario mantener una distancia contada sobre la película, entre el cuadro proyectado sobre la pantalla y el sonido correspondiente a él, de 19 $^{1}/_{3}$ cuadros, y puesto que en el proyector camina a razón de 24 imágenes por segundo, se precisa que también en la cabeza de sonido la película camine con velocidad constante. Como la película se desliza en ésta a razón de 456 mm por segundo (90′ por minuto) y en cada 30,5 mm hay 16 cuadros, llevando cada cuadro 4 perforaciones para el arrastre, resultará que la velocidad continua con que marcha la película en la cabeza de sonido para 456 mm por segundo vale 96 perforaciones por segundo. (Véase tabla adjunta de velocidades).

Tabla de velocidades aplicable a películas sin contracción

Imágenes por segundo	Metros de película por minuto	A razón de 24 imágenes por segundo pasan en minutos	metros de película	A razón de 24 imágenes por segundo se proyectan metros de película	en minutos
16	18,24	1	27,36	50	1,83
17	19,38	2	54,72	100	3,66
18	20,52	3	82,08	200	7,31
19	21,66	4	109,44	300	10,97
20	22,80	5	136,80	400	14,62
21	23,94	6	164,16	500	18,28
22	25,08	7	191,52	600	21,93
23	26,22	8	218,88	700	25,59
24	27,36	9	246,24	800	29,24
25	28,50	10	273,60	900	32,90
26	29,64	20	547,20	1000	36,55
27	30,78	30	820,80	1100	40,21
28	31,92	40	1094,40	1200	43,86
29	33,06	50	1368,00	1300	47,52
30	34,20	60	1641,60	1400	51,17
31	35,34	120	3283,20	1500	54,83
32	36,48	180	4924,80	2000	73,10
33	37,62	240	6566,40	3000	109,65
34	38,76			4000	146,20
35	39,90				

Pero esta velocidad puede sufrir variaciones por contracción de la película, como vamos a ver, y esto nos da una de las razones de la limitación en la contracción tolerable hasta el 1,5 %. La figura 231 representa un rodillo de arrastre de película, cuando ésta no sufre contracción en la parte superior y con contracción en la parte inferior; mientras que en el primer caso todos los dientes tiran de la película, por coincidir las distancias entre ellos con la separación de dientes, en la parte inferior sólo el diente *a* tira de la película, mientras que los otros no llegan a establecer contacto con los taladros; sólo cuando

por el giro del rodillo el diente *a* abandona la película, ésta queda un momento en reposo o retrasada, con respecto a su velocidad anterior, el tiempo suficiente para que el diente *b* del rodillo llegue a hacer contacto con la parte anterior del taladro de la película que le corresponde y ésta vuelva a adquirir la velocidad anterior; este proceso podrá, pues, repetirse en cada diente, y como el rodillo tiene una velocidad periférica de 96 dientes por segundo habrá, pues, 96 oscilaciones por segundo en la velocidad. El mismo fenómeno puede producirse también por desgaste excesivo de los dientes.

Para formarse una idea de cuál será el efecto de tal cambio de velocidad en la reproducción del sonido, consideraremos, primero, el efecto de un aumento o disminución de la velocidad *standard* antes señalada, prescindiendo momentáneamente de los efectos de desincronización, que al cabo de muy pocos segundos se realizaría. Para fijar las ideas supongamos un registro en área variable de un sonido puro de 1000 c/s, lo cual quiere decir que en 456 mm de película habrá 1000 crestas en el registro, siempre en la hipótesis, claro está, de haberse registrado a esta velocidad tipo; si ahora la película se desliza a 513 mm por segundo, el número de crestas contenidas en los 513 mm, que pasan en un segundo delante de la apertura de sonido, será de una sencilla proporción 1125, y el sonido será de 1125 c/s; es decir, el intervalo musical entre ambas notas será la *segunda mayor* (Capítulo X); y como otro tanto podría decirse de cualquier sonido, todos vendrán alterados en este sentido y la naturalidad del sonido puede alterarse profundamente, pues, por ejemplo, una voz masculina elevada una octava por este procedimiento aparece enteramente como una voz femenina. Lo contrario ocurriría si la velocidad fuese menor; en resumen, *la velocidad debe tener ese valor tipo de 456 mm por segundo.*

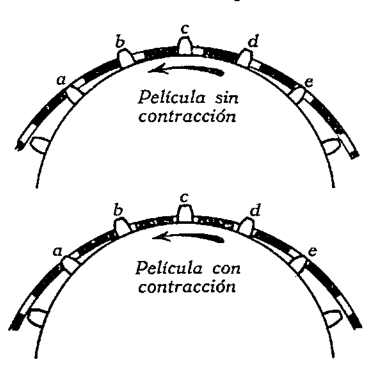


FIG. 231
Variaciones en la velocidad por contracción de la película

Veamos ahora las pequeñas variaciones de velocidad, y, como antes, supongamos un registro de un sonido puro de 435 c/s, lo que vale tanto como decir que tiene otras tantas crestas en cada 456 mm de película, y que la velocidad de arrastre de la película en la cabeza de sonido experimenta variaciones sobre su velocidad standard de $\pm 5\ \%$ en cada segundo. Entonces la velocidad oscilará entre 433,2 y 478,8 mm por segundo, y el sonido emitido entre 413 y 455 c/s; cuanto más frecuentes por segundo sean las variaciones de frecuencia del sonido, tanto más desagradable será el *trémolo* que por esta causa se produce, especialmente perjudicial en las notas altas; pero no sólo tiene lugar este efecto, que se conoce en el argot cinematográfico

diciendo que la nota *llora*, sino que, además, llegan a veces a aparecer *sonidos laterales*, es decir, de frecuencias igualmente distanciadas de la del sonido registrado en la banda sonora, por encima y por debajo de ésta, algo semejante a las bandas laterales que se presentan en una onda ordinaria modulada de Radiodifusión (véase más adelante, o la obra *Fundamentos de Radioelectricidad* de esta misma colección); estos sonidos laterales tienen a veces mayor intensidad que el registrado, el cual queda a menudo muy atenuado, y están distanciados entre sí por múltiplos de la frecuencia por segundo en la variación registrada (en el ejemplo anterior, 1 c/s), o por múltiplos del *wow-wow* con que se suele designar tal sonido; en resumen, *el sonido registrado puede quedar deformado por la aparición de varios wow-wow, generalmente disonantes con él, y por la atenuación de éste en una medida a veces tan grande que predominan aquéllos en la reproducción.* Tal fenómeno es conocido con el nombre de *lloriqueo (flutter)*, y como quiera que es típico y genuino de los sistemas de registro y reproducción sonora, y, además, no se le da la atención debida en casi ninguno de los manuales que sobre tales sistemas existen en castellano, vale la pena de hacer un estudio elemental, dentro de los reducidos fines de esta obra (1).

Tipos de flutter en la reproducción del sonido. Las causas de variación de velocidad en la película ante la apertura sonora pueden clasificarse en dos tipos, y son tanto más desastrosos sus efectos cuanto más elevada sea la frecuencia de reproducción registrada: impulsivas o irregulares y periódicas.

Entre las primeras se incluye toda causa de perturbación de la velocidad de la película que se presenta de un modo irregular en el sistema; como más importantes señalaremos: juego en los engranajes y pasos muertos en los *sinfín*, irregularidades en la tracción de la película en los sistemas que no llevan detrás del rodillo de arrastre de la cabeza sonora otro rodillo de contención que impida los tirones de la rueda almacén, presión irregular de los patines y rodillos presores de la película en la cabeza sonora, irregularidades por ser excesivamente cortos los bucles de película anterior y posterior de la cabeza sonora, carga variable del mecanismo intermitente de cruz de Malta, transmitida al mecanismo de arrastre de la cabeza sonora a través de los distintos engranajes y cuyo *flutter* suele caer en las proximidades de los 25 c/s, y oscilaciones *(hunting)* en la velocidad del motor que arrastra todo el sistema mecánico, etc.; son, en general, muy difíciles de estudiar y aun más de localizar.

Con referencia al motor que arrastra todo el sistema, vamos a dar alguna indicación somera sobre sus características: por regla general, mientras las cámaras tomavistas funcionan con motores síncronos de 1440 r p m (2 × 720), que corresponden a las 24 obturaciones por

(1) Su estudio completo exige el conocimiento de las funciones cilíndricas y sus propiedades más importantes.

segundo (con la finalidad de no emplear engranajes suplementarios), los motores de registro lo hacen a 1200, y ésta es también la velocidad de los motores de muchos sistemas de reproducción (Western, etc.), pero para mantener constante su velocidad, se emplea un sistema de redes eléctricas más o menos complejo; así, por ejemplo, en el sistema Western, sobre el mismo eje va montado el rotor de un alternador capaz de engendrar a esa velocidad una corriente de frecuencia de 720 c/s, la cual alimenta un puente de Weathestone que está equilibrado para esa frecuencia; el más ligero cambio de velocidad modifica la frecuencia, y, consiguientemente, el puente se desequilibra, enviando una corriente al motor de repulsión, que por tal razón modifica su velocidad en sentido contrario, haciendo que tome la frecuencia del alternador su antiguo valor. Las pequeñas oscilaciones de velocidad que se pueden engendrar por un exceso de sensibilidad, se acaban de corregir con el uso de un volante de masa adecuada (1).

Este tipo de regulación tiende a desaparecer, sobre todo, en los sistemas de tambor cinético, con estabilizador rotatorio, en los que se requiere que una gran cantidad de energía cinética pueda ser almacenada en el elemento en rotación, y, por ello, se emplean motores con grandes velocidades, generalmente 3000 r p m. Se utilizan en tales casos motores de inducción trifásicos; pero teniendo en cuenta que no todos los locales disponen de las tres fases, hay la tendencia generalizada de emplear motores de inducción monofásicos en los que el *deslizamiento*, que como es sabido es el que controla la velocidad del motor, es muy pequeño y con ello son también muy pequeñas las variaciones de velocidad. Este deslizamiento se determina en función de la carga en cada máquina y su tipo, y los engranajes necesarios para obtener la velocidad de arrastre de la película se calculan de modo que con el deslizamiento normal en el motor se obtenga en la máquina una velocidad muy próxima a la del sincronismo en la película; así, si esta velocidad exige una velocidad del motor de 3000 r p m y el deslizamiento del motor reduce la velocidad de éste a 2900 r p m, el motor se conecta al proyector de modo que los engranajes incrementan la velocidad en la relación 3000 a 2900.

Limitando el estudio del *flutter* al tipo periódico puro, digamos que éste tiene su origen en el rodillo de arrastre de la película en la cabeza sonora y puede ser de 6 c/s o *wow-wow* propiamente dicho y de 96 c/s; y mientras que el primero afecta especialmente a los sistemas de arrastre de tambor cinético, el segundo es más frecuente en los sistemas de progresión de ventana, sin que esto quiera decir que sean exclusivos de aquellos tipos.

El primero es originado por la rotación del rodillo de arrastre situado inmediatamente detrás de la apertura sonora, que gira a razón

(1) Una de las razones que han dado a los equipos Western, en España, la posibilidad de soportar ventajosamente la competencia de otras firmas, a pesar de su antigüedad, radica precisamente en este sistema de ajuste de velocidad.

de 6 vueltas por segundo; cualquier agente perturbador que actúe sobre el mismo y, por consiguiente, sobre la tracción de la película una vez en cada vuelta, tal como excentricidad del rodillo o su eje, desgaste o rotura de algún diente, variación momentánea de su velocidad por desgaste o rotura de un diente de la transmisión del movimiento a este rodillo, etc., son otras tantas causas de producción de este tipo de *flutter*.

El de 96 c/s se origina como consecuencia de una variación de la velocidad de la película en cada uno de los 16 dientes del rodillo de arrastre, y dado que éste gira a razón de 6 r p s, claro está que se producirán $6 \cdot 16 = 96$ variaciones por segundo, y ésta será la frecuencia del *flutter*. Ya hemos visto antes cómo por contracción excesiva de la película puede producirse un cambio de velocidad en cada diente, para la película, y las causas distintas de producción de este tipo son muy semejantes y correlativas de las del caso anterior. Este tipo de *flutter* cuya acción perturbadora es mayor en las notas sostenidas, es casi totalmente eliminado en los sistemas provistos de estabilizador rotatorio, y los más modernos de Westrex ideados después de la guerra.

Modulación en frecuencia. Hemos dicho antes que el *flutter*, cualquiera que sea su naturaleza, constituye una modulación en frecuencia, y sólo conociendo la naturaleza de ésta será posible explicarse la serie de fenómenos que antes hemos descrito; pudiendo admitirse con cierta aproximación que los de 6 y 96 c/s son de naturaleza sinusoidal; será para éstos y no para los impulsivos para los que la identidad sea más fácil de reconocer por ser el caso más sencillo [1].

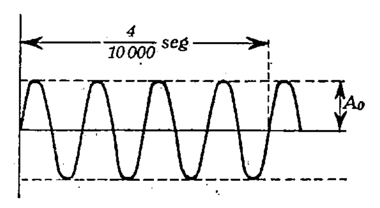


FIG. 232
Onda sin modular o portadora: $f_o = 10$ kc/s.

En la figura 232 se ha representado una onda de tensión o corriente sin modular de relativamente alta frecuencia, 10 kc/s, la cual, según sabemos (Capítulo I), puede expresarse por $a = A_o \cos (\omega_o t + \varphi)$. Esta onda se modula sobre su amplitud A_o, cual es el caso clásico de la Radiodifusión, sobre su frecuencia $f_o = \dfrac{\omega_o}{2\pi}$ o sobre su ángulo de fase φ; la única condición imponible a la frecuencia moduladora $f_m = \dfrac{\omega_m}{2\pi}$ es que sea muy pequeña con relación a la de la portadora f_o.

(1) Es curioso hacer notar que mientras en los reproductores sonoros se procura eliminar esta clase de modulación por sus efectos desastrosos, en Radiodifusión se va generalizando su uso por las indudables ventajas que presenta sobre el procedimiento clásico de modulación en amplitud. Véase nuestros *Apuntes de Radiotecnia*, pág. 52, y, mejor aún, nuestros *Equipos de baja frecuencia*, en preparación.

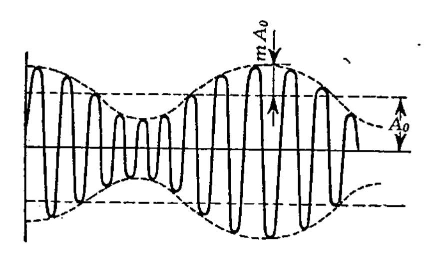


Fig. 233. Onda modulada en amplitud

1.° El caso de modulación en amplitud está representado en la figura 233 y su expresión analítica es dada por

$$a = A_o\ (1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_o t,$$

en la que para más sencillez hemos supuesto φ nulo; aquí m representa la profundidad o porcentaje de modulación, que para evitar deformación en la señal transmitida, no suele pasar en Radio del 80 al 90 % del valor de A_o. Esta expresión puede transformarse fácilmente en la siguiente:

$$a = A_o \cos \omega_o t + A_o \frac{m}{2} \cos (\omega_o + \omega_m) t + A_o \frac{m}{2} \cos (\omega_o - \omega_m) t,$$

la cual tiene la ventaja de ponernos de manifiesto que este caso puede considerarse como la suma de tres ondas sinusoidales; una, la portadora propiamente dicha de frecuencia f_o, y otras dos, ondas llamadas *laterales*, cuyas amplitudes son iguales y cuyas frecuencias son $f_o + f_m$ y $f_o - f_m$. La representación instantánea en forma vectorial a partir de la posición sin modulación está dada en la figura 234, en la que el vector A_o gira en sentido marcado por la flecha con velocidad angular ω_o, mientras que los otros dos vectores $A_o \frac{m}{2}$ giran con velocidades angulares $+ \omega_m$ y $- \omega_m$, pero ambos en sentido contrario, según marcan las flechas, el uno con respecto al otro y estando siempre simétricamente colocados con respecto a A_o; resultará, pues, que la resultante a de los tres será un vector de la misma dirección que A_o y cuya longitud oscila entre

$$A_o + mA_o \text{ y } A_o - mA_o.$$

2.° Supongamos ahora que mantenemos constante la amplitud A_o y modulamos sinusoidalmente el ángulo de fase, poniendo $\varphi = \Phi \cos \omega_m t$: la onda se convierte entonces en

$$a = A_o \cos (\omega_o t + \Phi \cos \omega_m t), \qquad (a)$$

y la representación instantánea vectorial será ahora la de la figura 235 en la que el vector A_o, oscila a uno y otro lado de su posición sin modulación, describiendo su extremo un arco de círculo de amplitud máxima Φ, a cada lado de esa posición sin modulación, que corresponde a un valor de φ nulo.

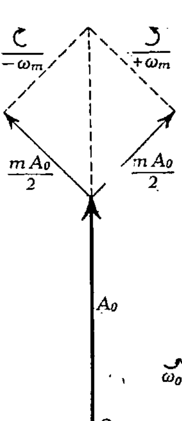


Fig. 234. Modulación en amplitud

3.° Finalmente, para la *modulación en frecuencia*, basta poner $\omega = \omega_o (1 - m \cos \omega_m \cdot t)$, y mediante consideraciones que de momento no interesan a los fines que nos proponemos, la onda a toma la forma

$$a = A_o \cos \left(\omega_o t + m \frac{\omega_o}{\omega_m} \cos \omega_m t \right). \qquad (\beta)$$

Esta expresión se identifica fácilmente con la anterior (¹) poniendo

$$\Phi = m \frac{\omega_o}{\omega_m},$$

y la figura 236 muestra una onda modulada en esta forma; en definitiva, las *modulaciones en fase y frecuencia son en la forma equiva-*

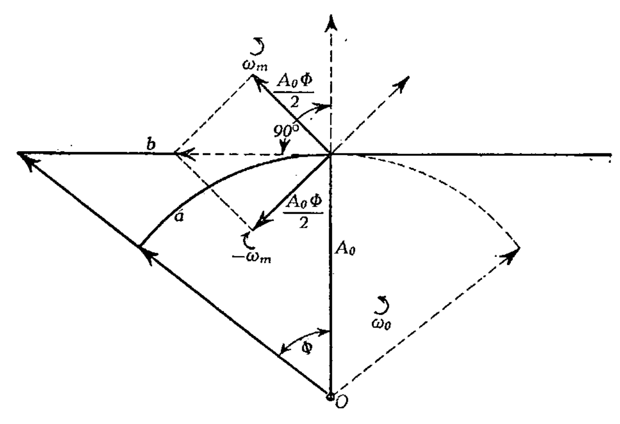


FIG. 235. Modulación en frecuencia. *a)* Trayectoria exacta del extremo de A_o. *b)* Trayectoria del mismo punto, en 1.ª aproximación para $\Phi < 0{,}5$

lentes. En la mayoría de los casos, el factor m suele venir dado por la máxima desviación relativa de frecuencia en la portadora, poniendo

$$m = \frac{\Delta\omega_o}{\omega_o} = \frac{\Delta f_o}{f_o};$$

se expresa en tanto por ciento de la frecuencia f_o y se le llama *profundidad o porcentaje de modulación*, y entonces la magnitud Φ toma la forma

$$\Phi = \frac{\Delta\omega_o}{\omega_m} = \frac{\Delta f_o}{f_m},$$

y se le llama por Van der Pol el *índice de modulación;* a la frecuencia f_m se le llama en este caso *razón* o *frecuencia de modulación*. Resulta, pues,

(¹) Esta identificacion es consecuencia de la expresión que hemos dado para ω y tiene gran analogía con la modulación en amplitud, ya qué si es Ω el máximo valor de ω, se tiene $\Omega = \omega_o (1 + m)$, y de aquí se saca fácilmente

$$m = \frac{\Omega - \omega_o}{\omega_o} = \frac{F - f_o}{f_o} = \frac{\Delta f_o}{f_o}$$

Obsérvese, además, que en tal caso se tiene la relación $\Phi = m \frac{f_o}{f_m}$.

que una onda modulada en frecuencia queda determinada cuando se conozca, además de su amplitud y frecuencia A_0 y f_0, el porcentaje de modulación y el índice de modulación, ya que conociendo estos valores se determina fácilmente f_m de la expresión del índice de modulación. Así, para poner un ejemplo concreto, si tenemos una onda modulada en frecuencia y tal que lo sea 20 veces por segundo con una profundidad del 0,25 % y su frecuencia propia es de 2000 c/s, se podrá determinar los otros valores así: (¹)

$$f_m = 20 \text{ c/s}, f_0 = 2000 \text{ c/s}, \Delta f_0 = \frac{0{,}25}{100} \cdot 2000 = 5 \text{ c/s y } \Phi = \frac{5}{20} = 0{,}25.$$

El estudio elemental de la expresión (α) o su equivalente (β) no puede hacerse desde un punto de vista elemental más que de un modo

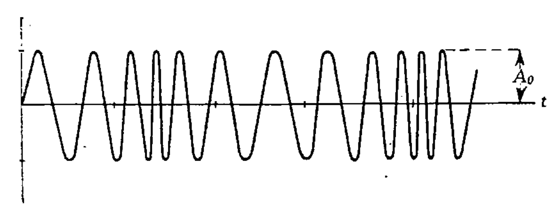


FIG. 236. Onda de amplitud constante, modulada en frecuencia

aproximado, y esto es lo que vamos a hacer en dos casos particularmente instructivos, según los valores del índice de modulación.

El primer caso corresponde a valores de este índice menores que 0,5, y para los cuales puede admitirse la sustitución del seno por el arco y del coseno por la unidad, con lo que después de algunas transformaciones, la expresión (α) puede escribirse así:

$$a = A_0 \cos \omega_0 t + A_0 \frac{\Phi}{2} \cos (\omega_0 + \omega_m) t - A_0 \frac{\Phi}{2} \cos (\omega_0 - \omega_m) t.$$

Esta expresión es idéntica a la de la misma onda, modulada en amplitud, salvo que la onda lateral de menor frecuencia tiene el signo cambiado, es decir, que ha experimentado una inversión de fase, lo que da como resultado un giro de 90° en la resultante de ambas ondas laterales, y en la figura 235 se da la representación vectorial que se obtendría en tal caso. El resultado que nos muestra tal figura, comparada con la figura 234, es que el extremo de a oscila a uno y otro lado del extremo de A_0 con la amplitud máxima angular Φ, pero en lugar de hacerlo a lo largo del arco de círculo, como debe ser en el caso exacto, lo hace aquí a lo largo de la tangente. En resumen: *para pequeños valores del índice de modulación, la modulación en frecuencia es equivalente a una modulación en amplitud, salvo la inversión de fase de la onda lateral de menor frecuencia.*

(¹) En los sistemas de Radar se suele llamar a f_m *frecuencia de repetición.*

El segundo caso corresponde al siguiente paso de aproximación, en que el índice toma valores mayores de 0,5, y, por tanto, la aproximación anterior no es correcta. Si suponemos (fig. 237) que el vector que representa la portadora se reduce de OA a OB, donde B es el centro de AC, la resultante de las ondas laterales del caso anterior $\omega_o + \omega_m$ y $\omega_o - \omega_m$ oscilará a uno y otro lado a lo largo de la línea DD', y otro tanto le sucederá al extremo de a. Pero si cuando se encuentra en B le agregamos a a un vector BA que gire a doble velocidad angular que la correspondiente a la frecuencia de modulación, es decir, $2\,\omega_m$, cuando la resultante de $\omega_o + \omega_m$ y $\omega_o - \omega_m$ se encuentre en D, aquel vector habrá invertido su posición, y, por consiguiente, la resultante total estará ahora con su extremo en E. Con ello hemos superpuesto al caso anterior *una modulación en amplitud* de valor igual a BA que corresponde a dos ondas laterales de amplitudes $\frac{AB}{2}$ y frecuencias correspondientes a $\omega_o + 2\omega_m$ y $\omega_o - 2\omega_m$, y en las que $AB = \frac{oA}{2}(1 - \cos \Phi)$.

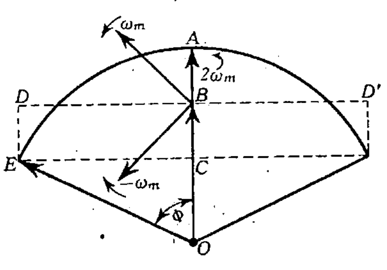


FIG. 237. Modulación en frecuencia, 2.ª aproximación, cuando $\Phi \geqslant 0{,}5$

De este modo, la representación de la onda modulada, con este 2.° grado de aproximación, será, para $\Phi = \frac{\pi}{2}$:

$$a \simeq \frac{A_o}{2} \cos \omega_o t + \frac{A_o}{2} \cos (\omega_o + \omega_m) t - \frac{A_o}{2} \cos (\omega_o - \omega_m) t +$$

$$+ \frac{A_o}{4} \cos (\omega_o + 2\omega_m) t + \frac{A_o}{4} \cos (\omega_o - 2\omega_m) t.$$

Ahora, la adición de los dos últimos términos nos muestra con las construcciones señaladas en la figura 238, que la trayectoria del extremo de a no es, como debía, un arco de círculo, sino la curva dibujada; para obtener una aproximación mayor se podría tomar para amplitud de la portadora un valor algo mayor que $\frac{A_o}{2}$, lo que elevaría la curva; pero ya en estos casos es más conveniente calcular las amplitudes como vamos a indicar.

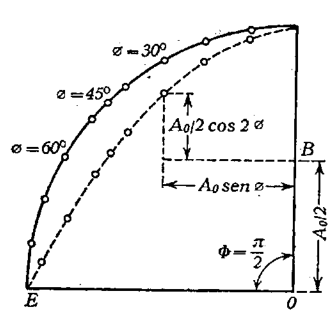


FIG. 238. Construcción señalada con $\varnothing = 30°$

Cuando se quieren obtener aproximaciones mayores se precisa entrar en estudios que se salen de los límites de este libro y de los cuales daremos solamente el resul-

tado: La onda modulada en frecuencia se descompone en la suma de una serie de ondas, de las cuales una de ellas tiene la misma frecuencia que la portadora y las otras tienen sus pulsaciones dadas por los valores $\omega_o \pm \omega_m$, $\omega_o \pm 2\,\omega_m$, $\omega_o \pm 3\,\omega_m \cdots$, es decir, están regularmente espaciadas por encima y debajo de la portadora y la distancia entre cada dos consecutivas es ω_m.

En cuanto a sus amplitudes, se pueden calcular a partir de las figuras 239 y 240, la primera de las cuales da las amplitudes relativas

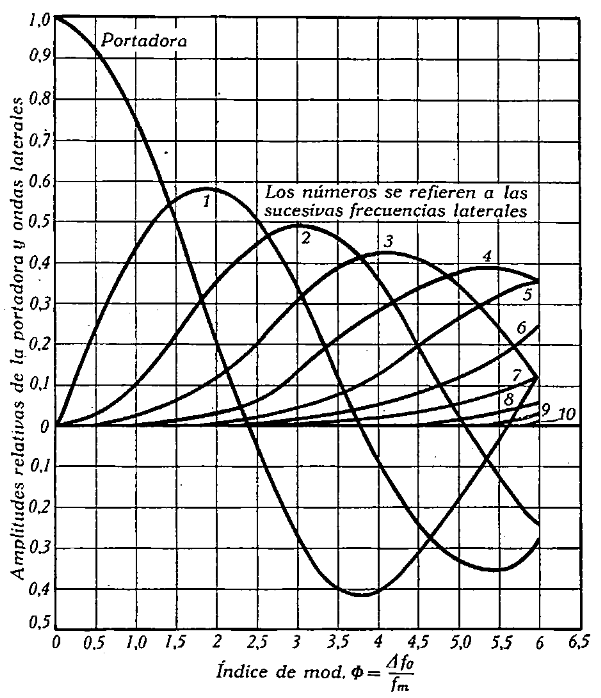


FIG. 239. Relación entre la portadora y las ondas laterales en modulación en frecuencia

en función del índice de modulación, mientras que la segunda da esas mismas amplitudes para cuatro valores particulares del índice.

La figura 241 muestra los valores relativos de las amplitudes correspondientes a las sucesivas ondas laterales para aquellos cuatro valores del índice de modulación construídas a partir de la figura 240.

De igual modo, la figura 242 muestra el espectro de frecuencias para una onda modulada en frecuencia al 5 % a razón de 20 c/s, cuya portadora es de $f_o = 2000$ c/s y cuyo índice de modulación después de estos datos valdrá $\frac{\Delta f_o}{f_m} = 5$. Tanto en esta figura como en la anterior se ve que, en ciertos casos, *algunas ondas laterales llegan a ser predominantes y que la portadora puede quedar notablemente reducida.*

Observación. En el caso de la modulación en fase se ve que las frecuencias de las ondas laterales dependen de la frecuencia de modulación ω_m, mientras que las amplitudes dependen de Φ que aquí es constante, y ambas son, pues, independientes; en cambio, en la modulación en frecuencia, como en el índice de modulación se encuentra imbricada la frecuencia de modulación, también las amplitudes dependen de la frecuencia de modulación; *ésta es la distinción esencial entre ambas clases de modulación.*

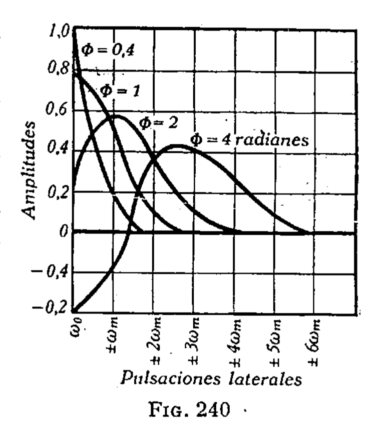


Fig. 240

Naturaleza del flutter. Después de lo dicho se comprende fácilmente que la deformación conocida por flutter es originada por una MF del sonido registrado en la película, producida por alguna de aquellas anormalidades en el sistema de arrastre de la película que crea variaciones periódicas en la velocidad de arrastre de la misma, con una frecuencia que no es otra cosa que la frecuencia de modulación, mientras que la variación máxima de la velocidad de la película nos permitirá deducir el porcentaje de modulación.

Así, por ejemplo, en el caso concreto del *flutter* de 6 c/s, si suponemos registrado en la película un sonido de 5000 c/s y por excentricidad del árbol del rodillo de arrastre, la frecuencia del sonido reproducido cambia a causa de las variaciones de velocidad de la película entre 5025 c/s y 4975 c/s, y esto se realiza evidentemente una vez por cada revolución del rodillo de arrastre; entonces es claro que girando éste a razón de 6 r p s, la frecuencia de modulación será 6 c/s, la profundidad de modulación $\frac{\Delta f_o}{f_o} = 0{,}5\,\%$, ya que $\Delta f_o = 25$ c/s y, por consiguiente, el índice de modulación $\frac{\Delta f_o}{f_m} = \Phi = \frac{25}{6} = 4{,}16$; con todos estos datos, de la figura 239, podremos deducir las amplitudes que corresponden a los diversos tonos laterales.

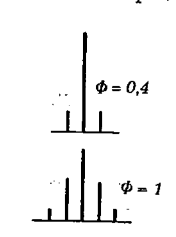


Fig. 241. Espectros acústicos de flutter para diversos valores del índice de modulación

Frecuencias	Amplitudes
$f_o = 5000$	0,37
$f_o + f_m = 5006$ $f_o - f_m = 4994$	0,15
$f_o + 2f_m = 5012$ $f_o - 2f_m = 4988$	0,32
$f_o + 3f_m = 5018$ $f_o - 3f_m = 4982$	0,42
$f_o + 4f_m = 5024$ $f_o - 4f_m = 4976$	0,31
$f_o + 5f_m = 5030$ $f_o - 5f_m = 4970$	0,15

Se ve aquí claramente que la portadora ha quedado reducida a un 37 % de su valor inicial y que los sonidos de frecuencias 4982 y 5018 c/s tienen una amplitud de 0,41 superior al reproducido de la portadora o sonido registrado; en resumen *el sonido está deformado.* Otro tanto podríamos repetir para el caso de los 96 c/s que se originan por el cambio de velocidad de la película en cada diente del rodillo de arrastre. Digamos, aunque no sea más que de un modo accidental, que los efectos subjetivos, es decir, lo que percibe el espectador como consecuencia de la MF o *flutter*, es muy influenciado por las condiciones reverberantes de la sala (véase Capítulo XX), de tal modo

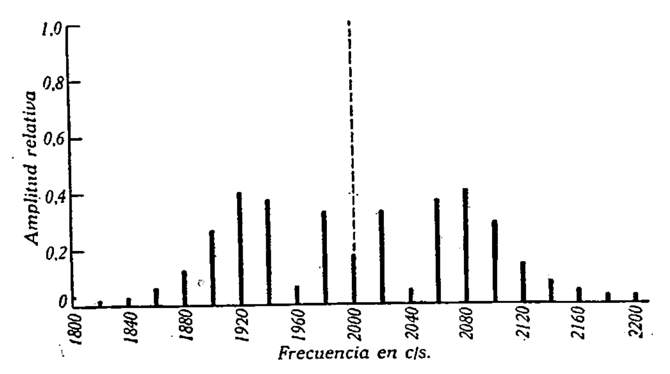


FIG. 242. Espectro acústico de ciertos sonidos de flutter

que puede modificar grandemente la naturaleza de la deformación, haciéndole aparecer como una verdadera modulación en amplitud si la sala es muy «viva».

Medios de reducir la influencia del flutter. Con el fin de atenuar en lo posible todo cambio impulsivo en la velocidad de la película y dar una permanencia muy grande a la velocidad del rodillo de arrastre de la película, se han empleado desde hace mucho tiempo *filtros mecánicos*, constituídos por una gran masa mecánica unida al eje de dicho rodillo y que almacena durante el movimiento una gran cantidad de energía cinética, presentando, por consiguiente, una gran resistencia a todo cambio brusco de velocidad, y con el fin de absorber las más pequeñas variaciones en la velocidad, la unión de este gran volante al eje no se hace de una manera rígida, sino a través de un sistema de muelles que transforma las variaciones de energía cinética que puedan originarse en energía potencial, desarrollada en la tensión y compresión de dichos resortes, la cual permanece almacenada en los momentos de incremento de velocidad y es restituída cuando aquélla disminuye. Un sistema especialmente eficaz, y que ha superado con mucho a los demás, es el adoptado en los equipos Western, en el que los resortes son reemplazados por dos fuelles huecos y llenos de aceite especial, los cuales se comunican entre sí por medio de un orificio rela-

tivamente estrecho; cuando por cualquier causa el volante, que es el que recibe directamente el movimiento, experimenta una aceleración, ésta tiene como efecto comprimir un fuelle impulsando el aceite en el otro a través del pequeño y estrecho conducto de comunicación entre ambos, y la resistencia del aceite en su paso difícil por ese conducto, unida a su viscosidad, absorbe la energía de la aceleración, que es luego lentamente restituída.

Sin embargo, tales sistemas han sido reemplazados casi totalmente en el año 1936 por el *estabilizador rotatorio*, aplicado a los sistemas de arrastre de tambor cinético. Este estabilizador consiste en un gran

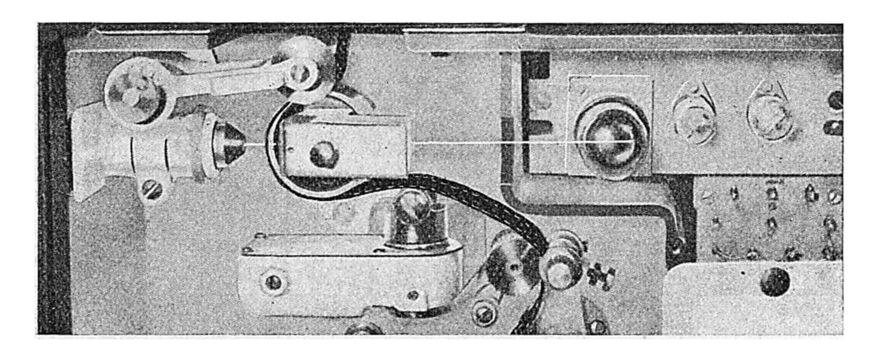


FIG. 242 *a*

volante que gira loco sobre un rodamiento de bolas y concéntricamente con el eje del tambor cinético; todo él va sumergido en un baño de aceite contenido en una caja de dimensiones interiores muy poco superiores a las del volante, y cuya caja es solidaria del eje del tambor cinético; cuando éste gira impulsado por la película, el volante se pone en movimiento únicamente por efecto de la viscosidad debida a la delgada lámina de aceite interpuesta entre la caja y el volante. La película, como se ve en la figura 230, abraza casi por completo el tambor cinético, obligándole a girar, pero en virtud de la pequeña tensión de aquélla, forma un bucle sobre el tambor casi completamente libre y la disposición especial del recorrido de la película, con las direcciones de salida del tambor y entrada en el rodillo de arrastre, sensiblemente perpendiculares, hace que cualquier movimiento brusco en el extremo de la película que llega al rodillo de arrastre, se transmita en escala muy reducida al extremo que abandona el tambor cinético, reduciendo grandemente la modulación que tiene su origen en los taladros de la perforación, o sealo s 96 c/s. Hasta el comienzo de la última guerra éste era el sistema más avanzado de eliminación de flutter, pero recientemente, como ya hemos indicado antes, Western ha desarrollado un sistema que supera los anteriores y permite sobrepasar los topes señalados en las especificaciones que dimos a su tiempo sobre sistemas reproductores de sonido.

Las figuras 242 *a* y 242 *b* muestra el supresor *Hydroflutter* utilizado en los equipos de postguerra Western tipo Westrex, el cual, como se ve, está intercalado entre el tambor de impedancia y el rodillo de arrastre que tira de la película. Cuando por cualquier causa hay un exceso de tensión motivada por una variación en la velocidad del rodillo de arrastre, ya sea ésta momentánea o transitoria, el guía del *hidro-*

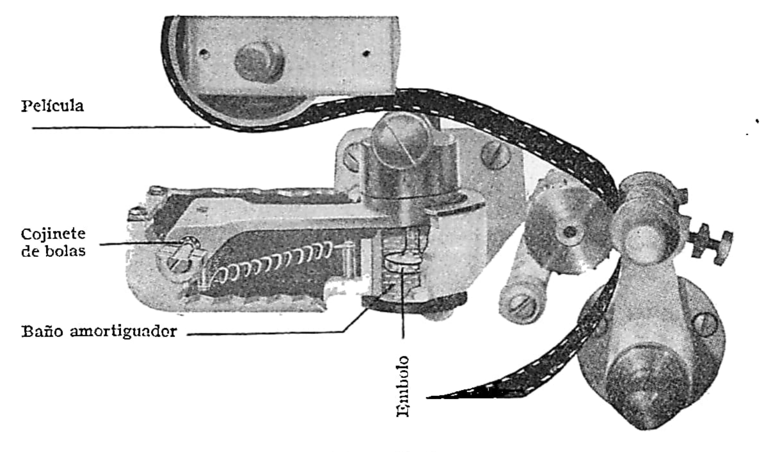


FIG. 242 *b*

flutter recoge este exceso de tensión suavemente por la acción del émbolo hidráulico con un líquido de viscosidad apropiada, manteniendo constante la tensión sobre el tambor de impedancia; si, por el contrario, la película, por disminuir la velocidad del rodillo de arrastre, disminuye su tensión sobre el tambor mecánico, el rodillo guía del *hidroflutter* se recupera, manteniendo en todo momento la tensión

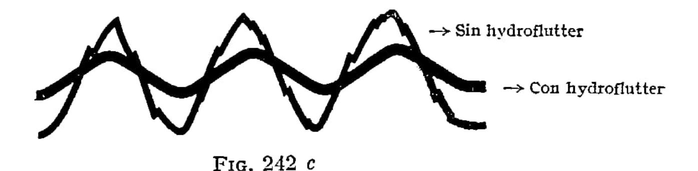


FIG. 242 *c*

constante sobre aquel tambor y logrando así eliminar dicho *flutter*. Para que se tenga una idea del avance logrado con tal sistema, diremos que se ha tratado de producir artificialmente el *flutter* desequilibrando el volante con una masa adicional de 5 gr y también colocando un trozo de cinta de 0,016″ de grueso en el rodillo de sonido, sin que el *flutter* originado por estas causas llegase a los altavoces, e idéntico resultado se obtuvo desalineando el rodillo presor. La figura 242 *c* muestra un oscilograma de los resultados obtenidos con el mencionado sistema.

XIII. Células fotoeléctricas y válvulas electrónicas

Electrones e iones y movimientos de los mismos. Los *electrones* pueden considerarse como las partículas de carga eléctrica más pequeñas conocidas y que son constituyentes de los átomos de toda clase de materia; tienen una masa de 9×10^{-28} gr, es decir, 1840 veces menor que la del átomo de hidrógeno, y una carga eléctrica negativa de $1{,}59 \times 10^{-19}$ culombios, y son estos dos números los que los determinan y siempre los mismos, cualquiera que sea el método empleado para obtenerlos (¹). Los átomos están compuestos de uno o varios electrones asociados con un *núcleo* mucho más pesado, el cual tiene una carga positiva (diferencia de varias positivas y negativas) igual al número de electrones que no forman parte de él, de tal modo que un átomo de cualquier clase de materia completo y en estado normal, es eléctricamente neutro. Las diferencias entre los distintos elementos químicos proceden de diferencias en el núcleo y en el número y disposición de los electrones, pero no en la naturaleza de éstos, que son idénticos siempre.

Los *iones positivos* representan átomos o moléculas que han perdido uno o más electrones, convirtiéndose en cuerpos eléctricamente cargados que tienen un peso igual al del correspondiente átomo o molécula de procedencia y una carga eléctrica positiva igual a la suma correspondiente de los electrones perdidos. En contraposición con los electrones, los iones no son todos iguales, y pueden diferir en su peso, en su carga eléctrica o en ambas cosas a la vez. Son mucho más pesados que los electrones y tienen analogías con el átomo o molécula de donde proceden, por lo que se designan con el nombre de iones-mercurio, iones-hidrógeno, etc. Los electrones e iones se producen separando los constituyentes del átomo o molécula, en moléculas carentes de algunos electrones de un lado y electrones libres del otro.

(¹) Estudios recientes han mostrado que, además de las propiedades inherentes a todo móvil cargado, los electrones en movimiento se comportan como ondas; pero de momento y para las aplicaciones que de ellos vamos a hacer tanto aquí como en el estudio de las lámparas, no tiene interés primordial; véase Gil Santiago, *Nociones de mecánica cuántica* en «Metalurgia y Electricidad», julio, agosto y noviembre 1941, y mejor aun M. Risco «Images Microscopiques correspondant a un Electron illumine» Journal de Physique. París, noviembre de 1947.

Hay varios métodos para lograr esta separación, pero aquí sólo nos vamos a ocupar de los que tienen interés para nuestro objeto. En la *ionización por colisión o choque*, que se produce en un gas, un ion o un electrón suficientemente rápido o veloz, puede chocar con una molécula, con bastante energía para romper ésta, arrancando uno o más electrones que quedan libres y el ion correspondiente; este tipo de ionización tiene lugar en las células fotoeléctricas y válvulas de los amplificadores que tienen gas en su interior, así como en las válvulas rectificadoras Tungar y otras análogas. En la *emisión termoiónica*, un cuerpo sólido puede calentarse suficientemente para que los electrones libres que hay dentro del metal adquieran bastante energía para atravesar la superficie libre del metal y salir al exterior del cuerpo sólido, de igual manera que ocurre en la evaporación de un líquido, quedando fuera del sólido estos electrones libres. En la *emisión fotoeléctrica*, los electrones libres o fotoelectrones quedan en tal situación, por la incidencia de ciertas radiaciones sobre un cuerpo sólido o un gas a la temperatura ordinaria; así, este fenómeno se observó primeramente con luz ultravioleta y con rayos X, pero después se ha comprobado también con la luz visible ordinaria y metales alcalinos, como cesio, potasio, etc., y constituye el origen de las células fotoeléctricas. Por último, existe la *emisión secundaria de electrones*, en la que un electrón puede llevar suficiente energía cinética en el choque con un cuerpo sólido, para arrancar electrones del cuerpo sólido, que de este modo quedan libres; sin embargo, en este caso se necesita tener previamente algún manantial de electrones o iones, para lograr tal emisión, y por eso se llama secundaria. Digamos, por fin, que con un campo electrostático suficientemente intenso, es aún posible desprender electrones de la superficie de un cuerpo sólido y esto tiene aplicación para incrementar en ciertos casos el número de electrones libres.

Tanto los iones como los electrones son cuerpos cargados y, por tanto, se hallan sometidos bajo la acción de un campo electrostático a las mismas fuerzas que un cuerpo eléctricamente cargado cualquiera; los electrones tienden a desplazarse por la acción de esa fuerza hacia el electrodo positivo, mientras que los iones lo hacen al cátodo o electrodo negativo. Esta fuerza F que actúa sobre el electrón puede calcularse, según se sabe, multiplicando la diferencia de potencial entre los dos puntos 1 y 2 del espacio entre los que se mueve el electrón $v_2 - v_1$, por la carga del electrón e:

$$F_{\text{dinas}} = (v_2 - v_1)_{\text{voltios}} \times e_{\text{culombios}} \times 10^7$$

Como esta fuerza actúa constantemente sobre dicho electrón, origina un movimiento acelerado, cuya aceleración, en el caso de que la velocidad sea pequeña con relación a la velocidad de la luz (en otro caso habría que emplear una corrección relativista), se calcula a partir de las leyes de dinámica clásica, es decir:

$$\text{Aceleración en cm/seg}^2 \text{ es igual a } \frac{\text{Fuerza en dinas}}{\text{Peso en gramos}}$$

De igual modo, y por la conservación de la energía, resultará que si el electrón camina entre dos puntos cuya diferencia de potencial en voltios es V, pierde una energía potencial dada por el producto $V \cdot e$ julios (e es la carga eléctrica del electrón en culombios), la cual se transforma íntegramente en energía cinética, de modo que llamando m a su masa gravitatoria y v a su velocidad, y teniendo en cuenta que 1 julio = 10^7 ergios, se tendrá

$$\frac{1}{2} mv^2 = eV \cdot 10^7,$$

y la velocidad en cm/seg para una diferencia de potencial de V voltios, valdrá

$$v = \sqrt{\frac{2\,eV \cdot 10^7}{m}} \text{ cm/seg} = 5{,}95 \times 10^7 \sqrt{V};$$

generalmente se expresa la velocidad por el número de voltios que la produce, ya que este número es manejable, mientras que expresada en cm/seg se requieren siempre números muy grandes; se deduce también que cuanto más pesado sea un cuerpo (ion con respecto al electrón) y para un mismo número de voltios V, menor será la velocidad adquirida.

Fenómeno fotoeléctrico. Se ha dado este nombre a la emisión de electrones por los metales bajo la influencia de radiaciones de longitud de onda suficientemente corta, principalmente radiaciones ultravioletas, y aún del espectro visible, que son las que en nuestro caso particular interesan; para que no venga enmascarado por otros fenómenos secundarios, la experiencia se hace en el vacío. Se ha encontrado que, para un metal dado, el efecto es tanto más marcado cuanto la longitud de onda es más corta, siendo la excepción más notable de esta regla los metales alcalinos que presentan una sensibilidad *selectiva* para ciertas regiones del espectro visible. Se ha comprobado que para cada metal existe un *límite fotoeléctrico*, es decir, una longitud de onda de la radiación incidente por debajo de la cual el efecto crece bruscamente, y por encima de la cual desaparece.

Se ha podido medir la *velocidad inicial* con la cual son lanzados desde el metal esos electrones, es decir, la velocidad con la que salen cuando no existe campo eléctrico alguno, y se ha comprobado que no depende dicha velocidad de la temperatura, y *que es igualmente independiente de la intensidad total de la radiación incidente*, pero, en cambio, *está íntimamente ligada a la frecuencia de dicha radiación;* lo único que varía con la intensidad de la radiación es el número total de electrones emitidos, es decir, la magnitud de la *corriente fotoeléctrica de saturación* (1), *la cual es casi exactamente proporcional a la intensidad de la*

(1) La saturación corresponde al caso de ser captados todos los electrones desprendidos por la radiación incidente.

radiación incidente. Para explicar todos estos fenómenos, que no encajan dentro de la teoría clásica de las ondas electromagnéticas, ha sido preciso admitir dos hipótesis confirmadas también por otra multitud de fenómenos dentro del campo de la Física; la primera supone que todas las ondas luminosas o radiaciones están constituídas por pequeñísimos corpúsculos de luz, llamados fotones, cada uno de los cuales [1] tiene una energía de valor $W = h\nu$ (donde ν es la frecuencia de la luz o radiación a que corresponde), y una cantidad de movimiento de valor $G = h\nu/c$, donde c es la velocidad de la luz, y su masa es prácticamente nula. La segunda hipótesis es que, puesto que el fenómeno es independiente de la temperatura, no es posible admitir que los electrones desprendidos por el metal bajo el influjo de la radiación sean los electrones libres que se encuentran dentro del metal como las moléculas de un gas dentro de un recipiente, sino que hace falta que dichos elementos pertenezcan precisamente a los átomos del metal, y que para lograr arrancarlos se precisa una cierta cantidad de energía mínima característica de la constitución de los átomos de dicho metal, y, por tanto, distinta de unos a otros. Entonces, la energía necesaria para arrancar un electrón de un átomo se la proporcionan los fotones de la radiación por una especie de choque con los átomos y para los cuales choques será válida la ley de la conservación de la física clásica; así se pudo, en 1905, formular la ley que rige este tipo de fenómenos, y según la cual, llamando m y v a la masa y velocidad del electrón, y a el trabajo necesario para hacer salir el electrón del metal, resultará que la energía cinética del electrón más el trabajo antes citado, será igual a la energía del fotón que chocó con el átomo, y, por tanto, se podrá escribir:

$$\frac{1}{2} mv^2 = h\nu - a \text{ (Ecuación de Einstein).}$$

Así resultará que el número de fotoelectrones emitidos será proporcional al número de fotones eficaces de la radiación; es decir, a su intensidad, y que la velocidad de emisión que antes hemos llamado velocidad inicial, depende de la frecuencia, pero no de la temperatura.

Si ahora se pone $a = h\nu_0$ en la ecuación de Einstein, ésta toma la forma

$$\frac{1}{2} mv^2 = h(\nu - \nu_0)$$

que muestra claramente que sólo habrá emisión para frecuencias superiores a ν_0, lo que nos da la explicación del límite fotoeléctrico antes citado.

---

(1) Véase Gil Santiago, *Sobre una expresión analítica de la frecuencia difundida por el choque de dos corpúsculos de radiación,* en la revista «Euclides», núm. 47, enero 1945. La letra h representa una constante llamada de Planck que vale $h = 6{,}55 \times 10^{-27}$ ergs $\times$ seg.

Sensibilidad espectral. La misma naturaleza del fenómeno fotoeléctrico y la ecuación de Einstein nos muestran ya, que por debajo de una determinada frecuencia ν_0 es imposible arrancar fotoelectrones de un cátodo determinado; pero, además, para un cierto metal, la velocidad varía con la longitud de onda emitida por el foco de luz incidente, y como casi todos son policromáticos, para estudiar esta sensibilidad para cada longitud de onda se aislan regiones muy estrechas de su espectro, bien mediante filtros (Wratten de Kodak, por ejemplo) o con monocromators. Sin embargo, estas determinaciones carecen de valor si no se determina la sensibilidad espectral dando el espectro del foco (que como sabemos suelen ser las excitadoras), mediante la *temperatura de color* de las mismas, que ya hemos definido anteriormente, tomando generalmente unos 2870° Kelvin para las excitadoras Mazda corrientemente empleadas en los equipos de reproducción, 2800° en las Osram y 2600° K para las Philips, cuya gráfica para estas últimas está representada en la figura 243, a modo de ejemplo. Como se observará, conviene precaverse contra la sensibilidad aparente así determinada ([1]), debido a que las células fotoeléctricas son generalmente muy sensibles a la luz invisible infrarroja, que no tiene existencia en las condiciones prácticas de cine sonoro por ser absorbida por los vidrios del sistema óptico.

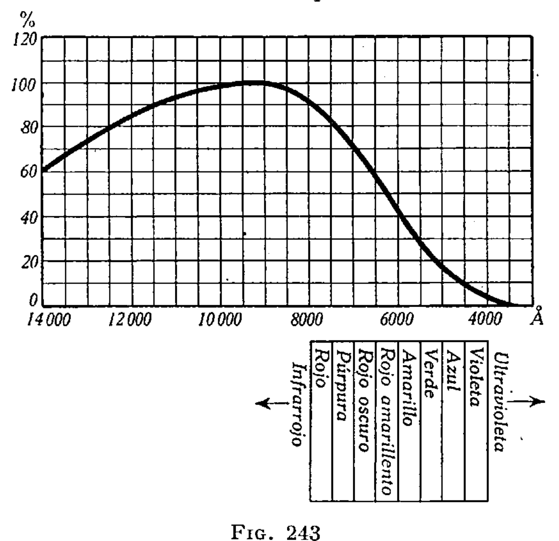


FIG. 243

También conviene tener muy en cuenta la caída de sensibilidad que se aprecia en los extremos del espectro originada por la absorción selectiva de los vidrios que constituyen la célula fotoeléctrica; en cier-

([1]) Si se toma como foco de luz la bujía Hefner que produce 4π lúmenes, las determinaciones de emisión son mayores que con una lámpara de wolfram patrón a 2600° K, que es una temperatura de color equivalente a la luz blanca; ello es debido a que la bujía es más roja y contiene más radiaciones infrarrojas que la lámpara de wolfram a esa temperatura y la célula es particularmente sensible a estas radiaciones. En cambio, sucede lo contrario si se toma, como hace la General Electric, la temperatura de 2870° K correlativa de la luz blanca. Western Electric emplea la de 2710° K. La sensibilidad en luz blanca, sin especificar la temperatura de color, dice muy poco de la célula, y tampoco dice nada (salvo desde el punto de vista práctico de utilización de la célula fotoeléctrica) la expresión de la sensibilidad en μA-Lm (microamperios por lumen).

tos usos es interesante que dichos vidrios sean bastante transparentes a la región infrarroja, y otros tipos de células —la RCA 868— presentan una gran sensibilidad en el infrarrojo, mientras que en los reproductores de sonido tiene más interés la λ_c de corte para el extremo ultravioleta. En las células RCA alcanza a las 3000 unidades Angstrom para las 868, 918, 920, 921 y 923 empleadas en cine.

Para obtener la sensibilidad selectiva para determinada región del espectro, y según la naturaleza del cátodo (cesio o rubidio en base de plata, potasio en base de plata o cobre y potasio o sodio sensibilizados, etc), es muy instructiva la figura 244; en ella se representa $P_\lambda \, \sigma_\lambda$ en función de la longitud de onda λ, y en la que σ_λ es la emisión del cátodo en microamperios por vatio de radiación recibida, correspondiente a la longitud de onda λ, y $P_\lambda \cdot d\lambda$ es la radiación en vatios entre λ y $\lambda + d\lambda$ recibida por la célula cuando la radiación *total* recibida del foco es un vatio. La temperatura del foco de luz es de 2800° K, y se supone que la distribución espectral de energía no cambia entre el foco de luz y la célula, no teniéndose en cuenta en el cálculo de P_λ el cambio introducido por el filtro o monocromator interpuesto. El área rayada en la figura, comprendida entre la base, las dos ordenadas y la curva, representa la corriente electrónica del cátodo, cuando es expuesta a la radiación del foco comprendida entre las dos ordenadas que lo limitan. La escala se ha elegido de modo que si la radiación total recibida por el cátodo del foco es un vatio, el área de cada cuadrado representa 25 μA, y, por tanto, aquel área rayada representa aproximadamente 34 μA, si sobre el cátodo incide un vatio de radiación del foco, a través de un filtro perfectamente transparente entre 500 y 600 mμ y perfectamente opaco para las otras radiaciones.

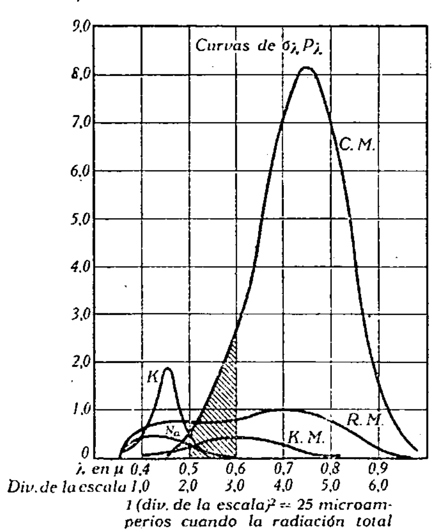


FIG. 244

En la figura 245 se ha representado P_λ en función de λ para el foco tipo correspondiente a esa temperatura de color. La emisión σ_λ en microamperios por vatio puede obtenerse dividiendo las ordenadas de la figura 244 por las de la figura 245, y los valores así obtenidos pueden emplearse para deducir la corriente producida por otro foco de luz, para el cual la función P_λ sea conocida, sin más que multiplicar los valores citados por los de la curva P_λ del nuevo foco, obteniéndose curvas semejantes a la figura 244.

Para que el lector tenga una idea de las sensibilidades corrientes, en la página siguiente damos una tabla de los datos relativos a algunas células Philips:

Cátodo	Frecuencia límite ν_0	λ	Sensibilidad
Cesio	$2000 \cdot 10^{11}$ ciclos	15 000 Å	20 μA/Lumen
Rubidio	$2700 \cdot 10^{11}$ »	11 000 Å	10 »
Potasio	$4000 \cdot 10^{11}$ »	7 500 Å	3 »

Mientras que la siguiente nos da las sensibilidades relativas a células General Electric para una *luz blanca* equivalente a una lámpara de wolframio a 2800° K:

Cátodo	Sensibilidad en μA/Lumen
Película Cesio en plata	15,0
» Rubidio plata	5,0
» Potasio en plata o cobre	2,0
Potasio sensibilizado	0,5
Sodio	0,5

La absorción selectiva que presentan los distintos tipos de cátodos depende también de la absorción de determinadas radiaciones por el cátodo, y de la complicada constitución del mismo, y en muchos casos, de la transparencia espectral del vidrio que constituye la célula, y es una propiedad peculiar y característica de los metales alcalinos, por cuya razón se emplean éstos casi exclusivamente para constituir los cátodos de las fotocélulas (fig. 245 bis).

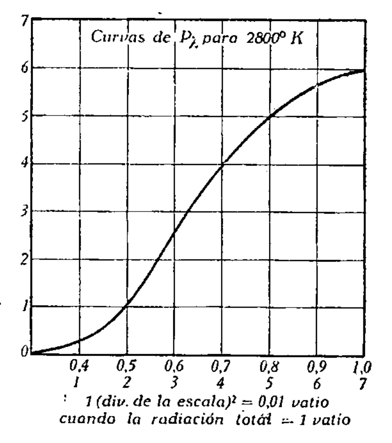


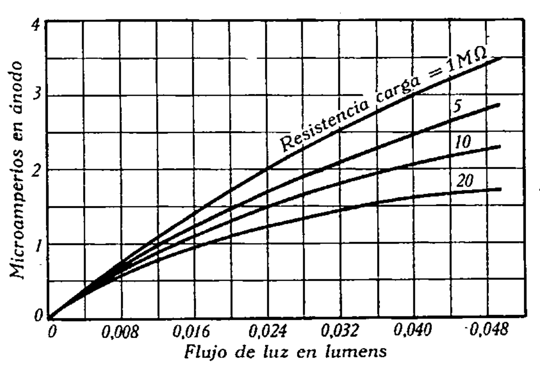
FIG. 245

Células fotoemisivas y sus tipos

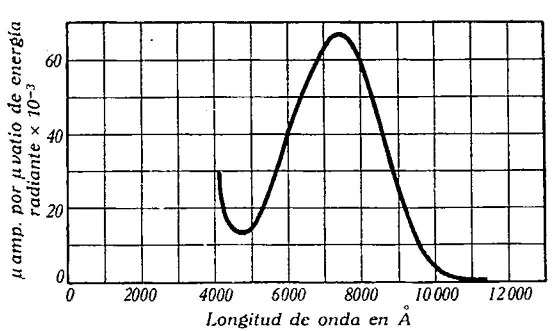
Una aplicación muy importante de los fenómenos fotoeléctricos de que acabamos de hablar, lo constituye las células fotoeléctricas, de las cuales existe gran variedad teniendo en cuenta la diversidad de aspectos que presenta aquel fenómeno; pero sólo de las fotoemisivas nos vamos a ocupar, por ser éstas las únicas exclusivamente empleadas en cine sonoro. Generalmente están constituídas por una ampolla de vidrio, dentro de la cual se encuentra un ánodo constituído por un anillo de alambre, una red tejida o una varilla muy delgada, situado en su centro de figura y un cátodo que, en la mayoría de los casos, está formado por delgadas capas de cesio, potasio, etc., recubriendo una lámina metálica en forma plana o cilíndrica que rodea ligeramente al ánodo, y sobre cuya superficie se hace incidir la luz; esta disposición tiende a obtener la mayor superficie de cátodo sobre la cual incida la luz y a lograr la absorción de ésta con la mayor eficacia por el cátodo.

con lo cual se aumenta su sensibilidad. La mayoría de las células de cine son de cesio y gas interior.

La geometría de la célula, es decir, la posición y dimensiones relativas de ánodo y cátodo, se diseña teniendo en cuenta la capacidad y conductancia entre los dos electrodos; el efecto de la primera, como veremos después, es perjudicial, por lo que se procura reducirla todo lo posible. En cuanto a la conductancia, su efecto es análogo al que se realiza en los condensadores electrolíticos, cual es la superposición de una corriente continua a la corriente fotoeléctrica; el valor de aquélla tiene interés en relación con el de ésta, que es la de trabajo, siendo en algunos casos muy perjudicial.



Fotocélula 920 alim. ánodo 90 voltios



Fotocélula 920 tensión alim. ánodo 90 voltios.
Resistencia carga 1 M Ω

FIG. 245 bis. Sensibilidad espectral

En general, existen dos tipos de células: las de *vacío* y las que *llevan un gas* (generalmente argón) a muy baja presión en su interior al objeto de aumentar la corriente fotoeléctrica aprovechando los fenómenos de ionización por choque de que hemos hablado antes; esa presión suele ser de algunas décimas de milímetro. Tanto en uno como en otro tipo el ánodo recibe una tensión con respecto al cátodo, que para las células fotoeléctricas empleadas en cine suele ser como máximo 90 V, y cuya tensión permite recoger sobre este electrodo los fotoelectrones que se producen en su seno por incidencia de la luz, transformando así las variaciones de flujo luminoso en variaciones de corriente en el circuito de dicho ánodo.

Características estáticas de las células. Prescindiendo de otros factores cuya influencia en la corriente de fotoelectrones suministrada por la célula tiene importancia insignificante, esta corriente puede considerarse como función de dos variables principales; la tensión de ánodo, y el flujo de luz incidente, y, por tanto:

$$i = f\,(V,\,\Phi) \qquad \begin{aligned} V &= \text{tensión ánodo} \\ \Phi &= \text{flujo de luz incidente.} \end{aligned}$$

Vamos a considerar primeramente cómo varía con la tensión, suponiendo el flujo constante, y las curvas así obtenidas, llamadas *características de tensión*, varían mucho según se trate de válvulas de vacío o de gas. Estas curvas para las células de vacío tienen el aspecto de la figura 246 —líneas llenas—, en la que se ve que presentan un gran parecido con las características semejantes de un pentodo (véase en este mismo capítulo *Pentodos*), presentando una zona inicial en la que la corriente crece con la tensión para un flujo fijo, aunque algo retrasada con respecto a un crecimiento lineal, para después hacerse constante, y, por tanto, la curva horizontal, por mucho que se aumente la tensión. Para un flujo de igual composición espectral, todas las curvas de la familia correspondientes a diferentes valores del flujo pasan por el mismo punto y se elevan tanto más cuanto mayor es el flujo incidente para hacerse después del *punto de saturación* sensiblemente paralelas. Es natural que a medida que aumenta la tensión de ánodo, mayor número de fotoelectrones son captados por éste, hasta que todos los emitidos son recogidos, en cuyo momento ya no puede crecer más la corriente y se obtiene la *saturación*. Si se reduce la λ incidente de la luz, el punto 0 se desplaza hacia la izquierda, como se deduce fácilmente de las consideraciones de energía cuántica de la luz incidente.

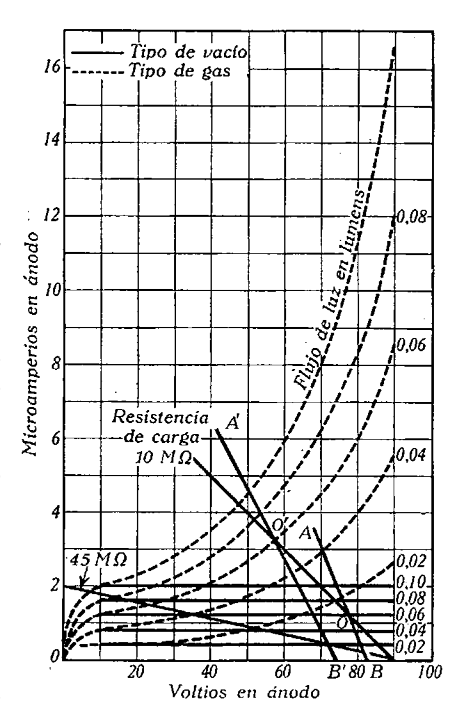


FIG. 246

Para las células de gas, estas características presentan, en cambio, un aspecto semejante al de la figura 246 —líneas de puntos—, y tanto en un caso como en otro, estas características desempeñan, como vamos a ver pronto, un papel semejante para la determinación de las condiciones de trabajo de la célula, al de las correspondientes en las válvulas de amplificación de Radio.

En el caso de las células de gas no existe como para las de vacío una *tensión de saturación* que haga la célula sensiblemente independiente de la tensión de ánodo para todos los valores de esa tensión superiores al de saturación; efectivamente, si aumentamos gradualmente la tensión de ánodo de la célula con gas, la corriente aumenta primero gradualmente, pero como los fotoelectrones no tienen sufi-

ciente velocidad para ionizar los átomos de gas, no se produce este resultado, y algunos de ellos, por el choque experimentado, ni siquiera llegan a alcanzar el ánodo.

Cuando aumentando progresivamente la tensión se logra que adquieran velocidad suficiente para producir la ionización por choque, iones y electrones contribuyen a aumentar rápidamente, con la ten-

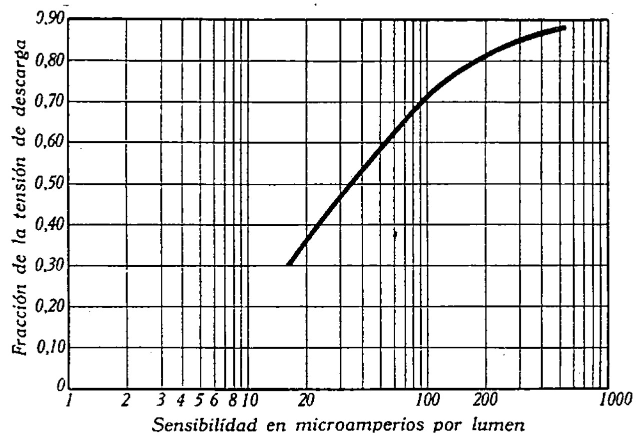


FIG. 247

sión, la corriente fotoeléctrica, y ello explica la forma de las curvas. Para estas células de gas, se define el *factor de amplificación del gas*, que es la relación entre la sensibilidad o corriente para la máxima tensión de ánodo permitida, a la que se obtiene con una tensión de ánodo suficientemente baja (unos 25 V en las células de cine) para justamente eliminar los efectos de ionización; en nuestro caso especial de cine no suele exceder de 10.

Si continuamos progresivamente aumentando la tensión de ánodo, llega un momento en que se produce un gran incremento de corriente con una descarga luminescente en el interior de la célula, y esa luminescencia continúa aun cuando la célula no sea excitada con luz; la tensión para la cual esa descarga luminescente se realiza, con la célula sin iluminar, se llama *tensión de descarga*, y depende mucho de la luz que ilumina la célula normalmente.

La figura 247 muestra, para una célula de cesio de General Electric, cómo varía la sensibilidad en función de la fracción de tensión de descarga, y se suele tomar un 65 % de la misma a fin de proteger la célula, porque sufre mucho en tales condiciones, y cuando se produce debe cortarse la tensión de ánodo inmediatamente a fin de no deteriorar la célula; esta curva no sugiere que la célula deba emplearse a otras tensiones de las marcadas por el fabricante, porque si la tensión es menor, se pierde sensibilidad y no se gana nada, y si se emplea a mayor tensión, se gana sensibilidad, pero se pierde estabilidad en

las condiciones de trabajo, y éstas se hacen irregulares; lo único que demuestra es la necesidad de mantener el voltaje de ánodo muy estable.

Característica $i = f(\Phi)$ para potencial constante. Tienen relativamente poco interés para su aplicación en cine sonoro, y como ya hemos indicado antes que el número de electrones no depende más que de la intensidad de la luz incidente, estas características son sensiblemente rectas, tanto más inclinadas cuanto mayor sea la tensión V; la figura 245 bis, parte superior, nos muestra las correspondientes a la célula RCA 920 utilizada en reproducción sonora para registro en contrafase, y para distintas cargas en ánodo.

Determinación del flujo de luz para una célula. Después de lo que dijimos al hablar de Fotometría, es relativamente fácil determinar el flujo de luz que debe proporcionar un foco en lúmenes, cuando se conoce su sensibilidad y las condiciones de trabajo, así como las dimensiones del cátodo o de la ventana que limita la entrada en la célula del haz de luz. Este flujo medido en lúmenes viene dado, después de la expresión (α) (Capítulo I), por la fórmula

$$\Phi = \frac{I \cdot S}{r^2} = \frac{I \cdot A}{144\, r^2} = 0{,}00137 \frac{I}{r^2}$$

supuesta la incidencia normal, y en la cual I es la intensidad o potencia del foco de luz en bujías, S la superficie que intercepta la luz sobre el cátodo en centímetros cuadrados, y r la distancia entre el foco de luz y el cátodo; en la segunda, A está en pulgadas cuadradas, y en la tercera se supone que la entrada de luz en la célula se hace a través de una ventanilla circular de 0,5″ = 12,7 mm de diámetro; todas ellas suponen que r es mucho más grande que la mayor dimensión del foco de luz. A continuación damos los datos de algunas excitadoras Mazda sin rodear de superficies reflectoras, que alterarían esos valores.

Vatios	Designación	Bujías iniciales aproximadas
15	A-17 *IF*	
25	A-19 *IF*	
40	»	34
50	»	35
60	A-21 *IF*	60
75	»	82
100	A-23 *IF*	120
150	A-25 *IF*	200

El número de la designación indica el máximo diámetro en 1/8″ y la *IF* significa vidrio opalino.

Funcionamiento de una célula en régimen permanente de luz. El comportamiento de una célula para unas condiciones de trabajo dadas puede predecirse de las características de ánodo o tensión, que hemos dado antes; estas características representan para las fotocélulas idéntico papel que las características de placa de las lámparas amplificadoras.

La figura 248 representa el circuito de una fotocélula en el que la tensión de salida se recoge a través de una impedancia Z_a; cuando incide la luz en la célula, pasa una corriente a través de Z_a y del interior de la misma célula fotoeléctrica, de tal modo que en todo momento las caídas de tensión a través de la célula y de Z_a deben, sumadas, igualar a la tensión E aplicada. Por consiguiente: la tensión a través de la fotocélula y la tensión a través de Z_a, para un valor de la luz incidente pueden determinarse por la intersección de una línea de carga, y la característica de ánodo de interés. Por ejemplo: si $Z_a = 10$ megohmios, $E = 90$ V y $\Phi = 0{,}04$ lúmenes, en la figura 246 se ve que la tensión de salida en la fotocélula de vacío es 8 V, mientras que en la de gas es de 25 V; si la carga es $Z_a = 45$ MΩ, la tensión de salida será 56 V para la fotocélula de gas y 37 para la de vacío. (¹) Se ve, además, que a medida que aumenta la impedancia de carga, la tensión de salida para la célula de gas se aproxima a la de la célula de vacío.

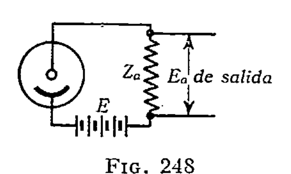


FIG. 248

El tipo de circuito representado en la figura 248 no es conveniente para la reproducción sonora, pero es adecuado para aplicaciones en las que una tensión continua alimenta la entrada de un amplificador que actúa como relé. Para este tipo de aplicación, la fotocélula de gas es más sensible que la de vacío a igualdad de tensión en la batería de polarización de ánodo de la fotocélula, y de carga Z_a. En cambio, la sensibilidad cambia con la edad de la célula, tensión aplicada y flujo de luz incidente, por lo que las condiciones de trabajo para este tipo de células no pueden ser tan críticas como para las fotocélulas de vacío, que bajo condiciones precisas dan una sensibilidad mucho más estable.

Sin embargo, este tipo de trabajo de la fotocélula no es el más interesante, y, desde luego, no tiene valor en cine sonoro, en que el amplificador que sigue a la célula debe responder únicamente a la componente modulada de la luz incidente, y entonces el criterio para determinar la fotocélula y su sensibilidad es distinto del anterior.

Funcionamiento en régimen modulado de luz; parámetros de una fotocélula. En los circuitos en los que interesa un régimen permanente de luz sin modular, como el anterior, la *sensibilidad estática* de la fotocélula es, simplemente,

$$S_e = \frac{I_a}{\Phi_a}$$

(¹) Basta en ambos casos determinar el camino en μ amp. y multiplicar por el valor de la impedancia de carga.

y la *resistencia interior* de la célula es

$$R_i = \frac{E_a}{I_a}$$

en las que I_a es la corriente en el punto de funcionamiento intersección de la línea de carga con la característica correspondiente al flujo incidente Φ, y E_a es la tensión de salida, y se supone Z_a no muy grande; más allá del punto de saturación se ve que ambos parámetros son muy variables para las células de gas en virtud de la gran variación de I_a, mientras que el primero es muy constante para las de vacío, por la constancia de dicha corriente. Estos dos parámetros se llaman *estáticos* en razón de que el flujo de luz es constante.

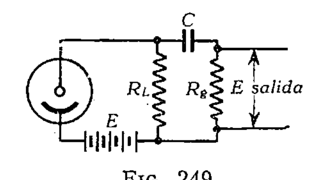


Fig. 249

Cuando el circuito en que trabaja la fotocélula es de tal naturaleza que la luz incidente está modulada, como en nuestro caso del cine, para citar un ejemplo, entonces se definen los parámetros *dinámicos* o *variacionales*, porque efectivamente corresponden a pequeñas variaciones de las magnitudes que los definen a partir del punto de trabajo correspondiente; como definición de la *sensibilidad dinámica* (1) tendremos, pues,

$$S_d = \frac{dI_a}{d\Phi}$$

esta sensibilidad dinámica es análoga a la transconductancia g_m de un tubo o válvula amplificadora. Se expresa en μ amperios por lumen.

Como, generalmente, la salida de la fotocélula alimenta un amplificador de tensión, interesa verdaderamente la *sensibilidad dinámica en tensión*, definida por la relación

$$S_v = \frac{dE_a}{d\Phi} \text{ (en } \mu\text{-voltios por lumen).}$$

Para encontrar la relación que existe entre ambas sensibilidades, podemos asimilar el circuito de la figura 249 al de una lámpara amplificadora, (véase este mismo capítulo, pág. 358), en que el cátodo es el manantial de los electrones, el ánodo recoge estos electrones y la luz variable incidente equivale a la tensión variable aplicada a la rejilla de la lámpara; en tal caso, la ecuación correlativa, de la que da la tensión alternativa de salida en la lámpara:

$$U_a = e_g\, g_m \frac{R_i\, Z_a}{R_i + Z_a}$$

(1) Estos valores variacionales se obtienen a partir de las características estáticas y se refieren a ellas (fig. 246).

para el caso de la célula será,

$$dE_a = d\Phi \cdot S_d \frac{R_i Z_a}{R_i + Z_a} \quad \text{con} \quad R_i = \frac{dE}{dI_a} \qquad (\beta)$$

la cual, según la anterior definición de S_v, se convierte ahora en

$$\boxed{S_v = S_d \frac{R_i Z_a}{R_i + Z_a}} \qquad (\alpha)$$

cuando Z_a crece indefinidamente, esta relación nos da, por un proceso que aquí no interesa, la relación que existe entre estos tres parámetros dinámicos de la célula:

$$\boxed{S_v = S_d R_i}$$

la cual es equivalente a la que después encontraremos:

$$R_i g_m = \mu$$

para un tubo amplificador.

La interpretación física de la ecuación (α) es importante; la resistencia interna de la fotocélula encontrándose en paralelo con la impedancia de carga, el cambio de la corriente originado por variación en el flujo de luz, produce una caída de tensión a través de la combinación de R_i y de Z_a; resulta, pues, que la tensión de salida puede ser baja aun cuando S_d sea grande, porque la resistencia interna de la fotocélula reduce la tensión engendrada. La resistencia interna de una fotocélula de vacío es muy grande, mientras que en las de gas es pequeña en un gran intervalo de su margen de trabajo, y puede determinarse en el punto de funcionamiento midiendo la pendiente de la característica de ánodo en el punto en cuestión; en cambio S_d es constante para las fotocélulas de vacío, sobre su margen de trabajo, pero no lo es para las células de gas, y esto explica por qué es muy indicado estudiar el comportamiento de las células por procedimientos gráficos. Dado que para las fotocélulas de vacío, análogamente a los pentodos, la R_i es muy grande, se puede calcular la tensión alternativa de salida para ellas por la expresión (1)

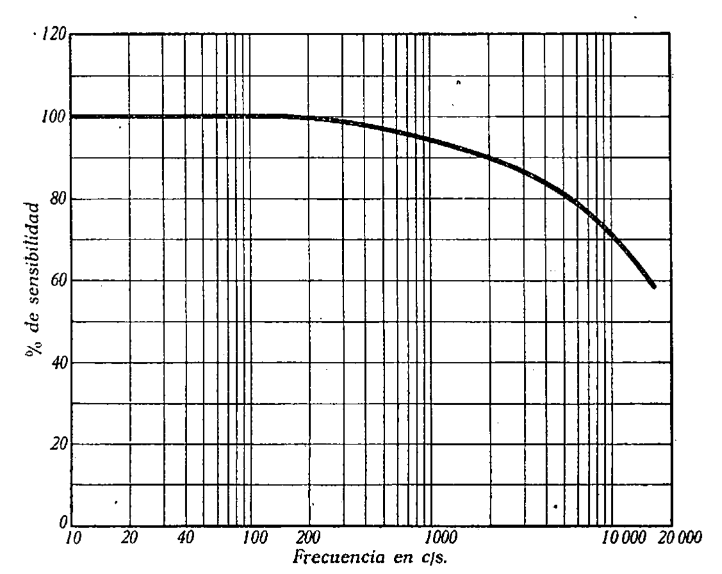
$$E_a = \Phi Z_a S_d;$$

pero téngase en cuenta que ahora se trata de las componentes alternativas.

En resumen: Salvo por los valores numéricos que toman los parámetros de la fotocélula, puede en todo asimilarse ésta a una válvula amplificadora, tal que a los parámetros de esta R_i, G_m y μ, corresponden

(1) Obtenida a partir de la primera (β) por paso al límite cuando R_i es muy grande.

respectivamente en la célula R_i, S_d y S_v. Con esta semejanza, la ecuación (β) representa lo mismo que la correlativa de la tensión de salida de una válvula amplificadora cargada con una Z_a, y, siempre que se mantenga esta semejanza, todos los métodos que demos allí para determinar las condiciones de trabajo de las válvulas amplificadoras son aplicables aquí con las mencionadas sustituciones de los parámetros.



Tipo 918 Alim. ánodo 90 voltios. Caída tensión en *Za* despreciable. Capacidad propia célula despreciable

FIG. 250. Característica de sensibilidad

Respuesta de las células fotoeléctricas a la frecuencia de modulación de la luz. Esta característica, que nos da como varia la sensibilidad de la célula fotoeléctrica en función de las distintas frecuencias con que la luz es modulada, tiene muchísimo interés en reproducción sonora porque nos proporciona una medida de los sonidos que podrá reproducir dentro del espectro audible. Como casi todas son del tipo de gas, nos vamos a referir a ellas exclusivamente. Ya hemos visto que puesto que dentro del dominio de trabajo las características $i = f(\Phi)$ son rectas, la sensibilidad es prácticamente independiente de la cantidad de luz; no sucede lo mismo con respecto a la frecuencia de modulación de la luz. Esta propiedad es especialmente característica en las fotocélulas de gas y se debe a que, según ya hemos dicho, los iones, por ser más pesados, adquieren también menor velocidad; entonces esto lleva como consecuencia un cierto *tiempo de retardo*, entre la rotura de un átomo de gas por choque y el incremento en la emisión debido al ion positivo que se ha formado. Cuando actúa una luz pulsante, las fluctuaciones en la emisión debida a los iones positivos, van

ligeramente retrasadas con respecto a las fluctuaciones de la emisión de los fotoelectrones; y para las altas frecuencias de modulación de la luz, este retraso lleva consigo una atenuación en la componente alternativa de la corriente total de la fotocélula y, por tanto, de su sensibilidad. Esto hace que estas células de gas no sean aplicables, por ejemplo, en televisión, donde las variaciones son muy frecuentes; en cambio, para las más bajas frecuencias del espectro audible, la sensibilidad de las de gas es casi igual a su sensibilidad estática.

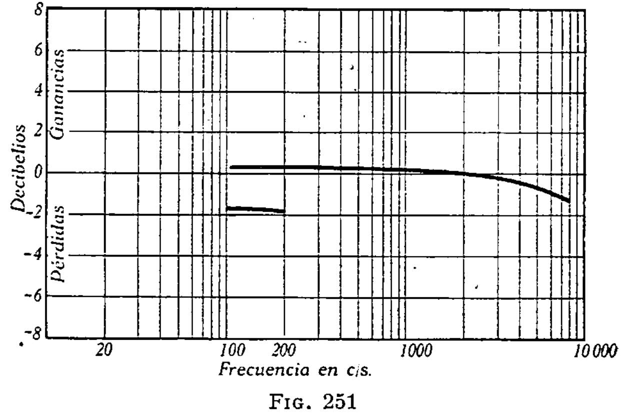


Fig. 251

Esta sensibilidad para luz pulsatoria se mide con luz incidente que varía sinusoidalmente entre cero y el doble de un valor medio específico. La curva de la figura 250 muestra los valores de la sensibilidad de la célula fotoeléctrica de RCA 918 que emplea *Simplex* en sus equipos para la gama de audiofrecuencias normal; se observa que la sensibilidad a 10 000 c/s es el 29 % por debajo del valor a los 100 c/s, lo que representa unos 20 log 0,29 = 3 dB y en algunas, como la 868, no excede de 2 dB.

Las figuras 251 y 252 nos dan la fidelidad en audiofrecuencia de la célula CMG 8 de G. E. y la de una célula corriente de potasio; en la primera de ellas se ve que la pérdida para 8000 c/s es solamente 1,5 dB respecto a 1000 c/s. Normalmente, esta fidelidad se da por la sensibilidad a cero, 1000 y 5000 c/s que, por ejemplo, para la 918 valen 110, 102 y 93 $\frac{\mu A}{Lm}$, y tales sensibilidades se determinan con una excitadora de tungsteno, generalmente Mazda, a una temperatura de color determinada, 2870° K, y suponiendo despreciables los efectos de capacidad interior de la célula, con una tensión de ánodo igual a 90 V, que es la de trabajo, y una carga tal que su caída de tensión es despreciable; para cero c/s o 100 c/s, que viene a dar igual valor, el foco produce una entrada de luz en la célula de 0,02 lúmenes, y para 1000 y 5000 c/s el flujo medio vale 0.015 lúmenes y se modula al 100 %. Estos datos corresponden a fotocélulas RCA, pero sensiblemente son idénticos a los empleados para otros tipos de células.

Deformación por armónicos. Como ya hemos indicado antes, el tipo de conexión de la fotocélula al circuito de utilización en el caso de reproducción de sonido, no se verifica según el esquema que dimos

en la figura 248, sino tal y como está indicado en la figura 249, y vamos a considerar este caso para las *frecuencias bajas*, en las cuales el condensador de acoplamiento C presenta una impedancia despreciable, y su misión principal es la de impedir que la tensión de ánodo de la célula alcance la rejilla de la válvula amplificadora cuyo circuito está en paralelo con R_g. La línea de carga R_L para luz sin modular es la combinación de las dos en paralelo R_L y R_g. Para predecir el funcionamiento de la fotocélula, cuando la luz es modulada, supongamos que el flujo incidente constante sea de 0,06 lúmenes y tracemos la línea de carga $R_L = 10\ M\Omega$ para 90 V de la batería, como se ve en la figura 246. Para régimen sin modular, el punto de funcionamiento será 0 para la fotocélula de vacío, y 0′ para la de gas.

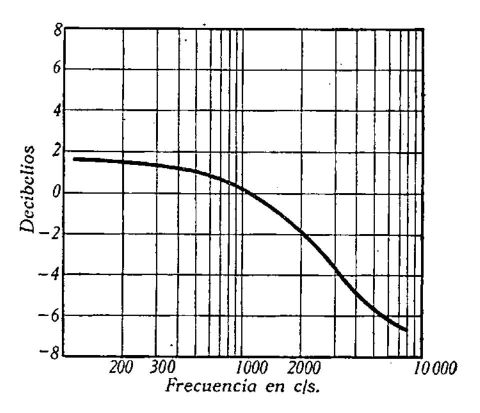


FIG. 252. Respuesta en frecuencia de una fotocélula corriente de potasio

Si elegimos, por ejemplo, para mayor sencillez, $R_L = R_g$ y la amplitud sinusoidal de la luz incidente es constante, las líneas AB y $A'B'$ serán ahora las características de trabajo para los dos tipos de célula. Si ahora modulamos la luz incidente al 66, $\frac{2}{3}$ %, pongamos por ejemplo, los valores de cresta de la luz incidente oscilan entre un máximo de 0,1 lumen y un mínimo de 0,02 lúmenes, y de la misma figura se deduce que los correspondientes cambios de voltaje a través de R_g son $67{,}5 - 51 = 16{,}5$ V en la fotocélula de gas y $82 - 74 = 8$ V en la de vacío; éstos son los cambios totales de tensión, y la amplitud máxima de la componente fundamental del sonido a reproducir será aproximadamente la mitad de esos valores.

Resulta, pues, comparando con las correlativas variaciones del flujo incidente que, para una variación sinusoidal de este flujo, la deformación es prácticamente nula en la fotocélula de vacío y apreciable en la de gas.

Como dijimos antes que la célula era en todo asimilable a un tubo amplificador, podremos aquí aplicar las mismas relaciones que se dan allí para calcular el porcentaje de deformación del segundo armónico de frecuencia doble de la de la luz incidente, que valdrá

$$\%\ 2^\circ \text{arm} = \frac{(I_{\text{máx.}} + I_{\text{mín.}} - 2\,I_0)}{2\,(I_{\text{máx.}} - I_{\text{mín.}})} \times 100$$

donde $I_{\text{máx.}}$ e $I_{\text{mín.}}$ son los valores máximos y mínimos de la corriente, e I_0 es el valor de la corriente en el punto de funcionamiento; reem-

plazando estos valores por los obtenidos de la figura 246, se tiene

$$\frac{4,6 + 1,3 - 2 \times 3,2}{2\,(4,6 - 1,3)} \times 100 = -7,5\ \%$$

El signo menos indica que dicho armónico está en oposición de fase y, por tanto, que la corriente es menor con modulación que sin modular. Este análisis nos muestra también que una vez elegidos R_L, R_g y E, la célula de gas nos da casi el doble de salida en tensión que la de vacío, pero, en cambio, contiene mayor deformación, la cual, tanto en una como en otra, es debida a la falta de linearidad de las características.

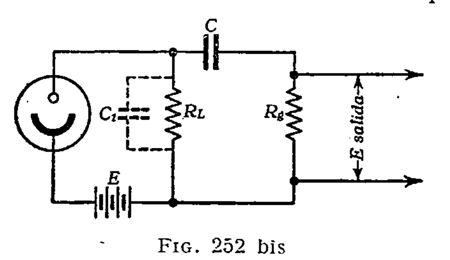


Fig. 252 bis

Influencia de la capacidad propia de la fotocélula en las altas frecuencias. Dijimos antes que la capacidad entre electrodos de la célula es perjudicial y origina una pérdida de altas frecuencias; en las células actuales de cine tipo de gas, esta capacidad adquiere valores que oscilan entre 2,4 y 1,5 picofaradios, y, por tanto, prácticamente no pueden tomarse en cuenta; pero como dicha capacidad viene a sumarse a la propia de la resistencia de carga, y a la más predominante del cable que conecta la fotocélula al primer tubo amplificador, tiene interés conocer su influencia; todas estas capacidades parásitas podemos englobarlas en una sola de valor C_1, que se encuentra en derivación sobre la resistencia de carga R_L de la fotocélula (fig. 252 bis). Si se quiere obtener en la salida grandes variaciones de tensión, hace falta elegir una gran resistencia de carga; pero entonces, si bien aumenta la ganancia, decrece la fidelidad por aumentar la deformación, lo cual se comprende fácilmente observando la región de las características de tensión de cualquier célula de gas para grandes valores de la carga, región en la cual las características son muy convergentes y no paralelas, como sería necesario para una buena reproducción. La figura 253 nos muestra para la célula RCA 868, especialmente

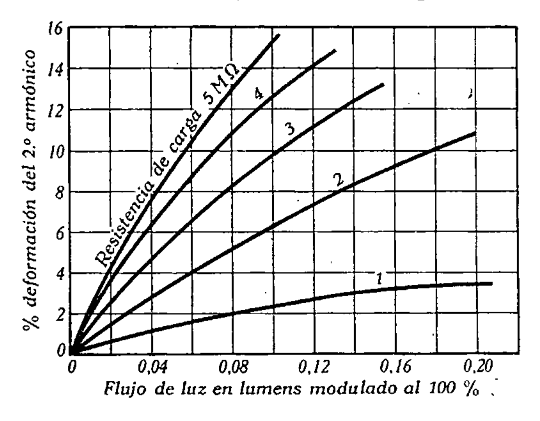


Fig. 253. Tipo 868. Alim. ánodo 90 voltios. Frecuencia de modulación 200 c/s.

sensible en luz roja e infrarroja, cómo aumenta el tanto por ciento del segundo armónico con la resistencia de carga.

Prescindiendo de momento de todo cuanto sigue a R_L, la impedancia combinada de esta resistencia y tal capacidad parásita viene dada por

$$Z_a = \frac{R_L}{\sqrt{1 + (\omega\, C_1\, R_L)^2}} = \frac{R_L}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_o^2}}}$$

con $\omega = 2\pi f$

$$\omega_o = \frac{1}{R_L C_1} \text{ y } f_o = \frac{1}{2\pi R_L C_1}$$

y, por consiguiente, el voltaje desarrollado en los extremos de R_L varía con la frecuencia según este valor.

Con ayuda de esta expresión se ha construído la figura 254 para $R_L = 1\ M\Omega$ y distintos valores de la capacidad parásita, y nos per-

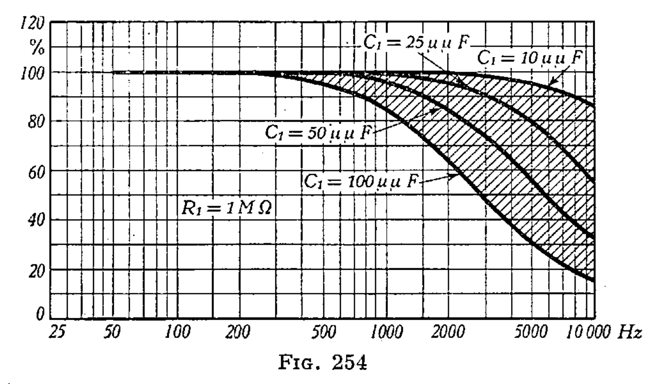


FIG. 254

mite determinar las pérdidas en decibelios sin más que tomar 20 log del tanto por ciento de la tensión que se obtiene a 100 c/s.

En ella se ve que hace falta reducir cuanto sea posible esa capacidad parásita para evitar pérdidas en las altas frecuencias; de otra parte, la misma característica puede obtenerse con distintos valores de C_1 siempre que correlativamente se modifique el valor de R_L para que el producto $R_L \cdot C_1$ se mantenga constante en el denominador; en definitiva, el *efecto de C_1 es reducir el valor de la resistencia de carga R_L en la medida que aumenta aquella capacidad.* Claro está, esta reducción lleva consigo una reducción de la ganancia, que puede determinar en ciertos casos la elección de otra célula de mayor sensibilidad.

Existen dos procedimientos para acoplar la fotocélula a la primera válvula amplificadora de tensión; colocando ésta lo más cerca posible de la cabeza de sonido y mediante transformador; es la primera la solución de los amplificadores previos colocados en las mismas máquinas que soportan crono, cabeza sonora, etc.; pero entonces hay que precaverse contra las trepidaciones que pueden excitar la *microfonicidad* de las válvulas, y emplear cables especiales de baja capaci-

dad, y bien pantalleados, para evitar cualquier interferencia que aquí, por el bajo nivel de la señal, produce efectos perjudiciales muy fuertes. Con el mismo fin, las lámparas de los previos deben montarse sobre resortes o cualquier otro sistema amortiguador de toda clase de vibraciones.

Cuando se utiliza el acoplamiento mediante transformador, éste se coloca inmediatamente después de la fotocélula y es reductor de tensión, cuya salida está conectada a un cable, y al otro extremo de éste se coloca otro elevador, acoplado a la primera válvula amplificadora; la construcción de dichos transformadores no es fácil, y la mayoría de las veces se originan pérdidas en las altas y bajas frecuencias (véase Capítulo XV, pág. 424).

La idea, que parece inmediata, de utilizar una fotocélula aunque su sensibilidad no sea muy grande (cuya carga R_L no puede elevarse por la capacidad parásita), y de aplicar una gran amplificación en tensión, mediante varios pasos o etapas de amplificación, no es factible porque entonces es muy fácil la producción de ruidos parásitos de cualquier origen y la de perturbaciones inducidas en el circuito de la fotocélula, que aunque sean de muy pequeño valor absoluto, relativamente a la señal ahora tan débil, son grandes, y tienen un efecto muy perjudicial; por lo general, los previos no suelen llevar más de dos pasos de amplificación. La mejor solución, pues, radica en aumentar la sensibilidad de la célula y emplear los mayores valores posibles de la carga compatibles con una deformación tolerable. (1)

Ruidos de la fotocélula y su carga R_L. En la fotocélula existen, como en todas las demás clases de lámparas, una serie de manantiales de ruidos que son característicos y se manifiestan principalmente cuando las señales a amplificar son débiles; entre otros, vale la pena de citar: el *efecto térmico* de los electrones libres en los conductores, debidos a su agitación térmica; los ruidos de *microfonicidad*, producidos por vibraciones de algunos elementos que al modificar las distancias, alteran también algunos parámetros de naturaleza geométrica, y con ellos las magnitudes eléctricas que dependen de ellos; el *efecto de descarga o bombardeo (shot effect*, en inglés; *Schroteffeckt*, en alemán), motivado por las irregularidades en el flujo discontinuo de los fotoelectrones y la ionización del gas, generadores ambos de fluctuaciones pequeñas en la corriente fotoeléctrica, y, por último, el efecto de centelleo *(flicker)*, originado por una emisión irregular o desigual en la superficie del cátodo; su conjunto se conoce como un silbido *(hiss)*, especialmente característico en los circuitos de válvulas, células y asociados.

Los más predominantes y característicos en las células fotoeléctricas son el *térmico* y el de *bombardeo* descubierto o estudiado por Schottky. Se puede demostrar que el valor cuadrático medio de la osci-

(1) Modernamente se suele utilizar un tubo *seguidor de cátodo* (cathode follower) como salida de previos, que presenta una impedancia de salida baja, y dificulta las interferencias en la línea de salida.

lación de corriente originada por el efecto Schottky viene dado por

$$\overline{I^2} = F^2 \cdot 2e \cdot I_a \, (f_2 - f_1);$$

en la que F es un factor constante que para la corriente de saturación toma su valor máximo igual a uno, e es la carga del electrón, I_a es la componente continua de la corriente de ánodo, y f_2-f_1 representa la amplitud de la gama de frecuencias en la que el efecto se estudia y que para más simplicidad reduciremos a 1.

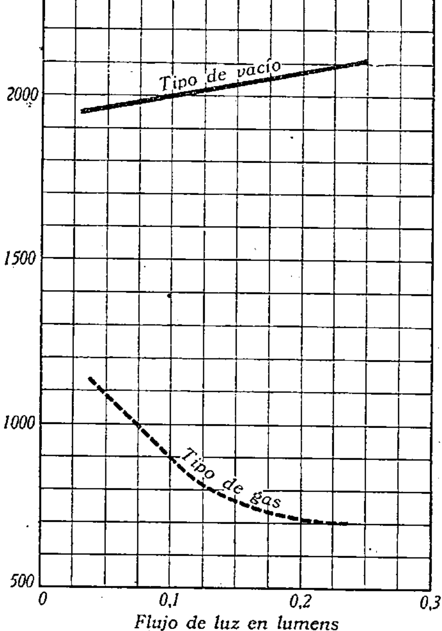
De igual modo, y por consideraciones que de momento no interesan, se puede determinar el valor cuadrático medio de la tensión que la agitación térmica desarrolla en R_L, el cual viene dada por

$$\overline{E_T^2} = 4 \cdot K \cdot T \cdot R_L \, (f_2 - f_1),$$

en donde $K = 1{,}37 \cdot 10^{-23}$ julios por grado es la constante de Boltzmann de los gases, T es la temperatura absoluta, que suele ser de unos 300° K, y R_L el valor de la resistencia de carga de la fotocélula; los demás símbolos tienen la misma significación, y, como antes, igualaremos a uno la gama de frecuencias. La tensión cuadrática media correspondiente al primer efecto, la obtendremos multiplicando los dos miembros por R_L^2, lo que nos dará

$$\overline{E_F^2} = F^2 \cdot 2 \cdot e \cdot I_a \cdot R_L^2 \, (f_2 - f_1),$$

y de la comparación de ambos deducimos que el crecimiento de $\overline{E_F^2}$ con R_L es más rápido que el de $\overline{E_T^2}$.



Circuito de la figura 248

FIG. 255. Relación señal/ruido para células típicas

Por otra parte, es evidente que el cuadrado de la tensión de señal que debe reproducir la célula, crece proporcionalmente al cuadrado de R_L, y, por tanto, mientras $\overline{E_T^2} > \overline{E_F^2}$ será ventajoso aumentar en lo posible el valor de R_L para mejorar la relación Señal/Ruido, o, como hemos llamado en otra ocasión, aumentar la latitud de volumen. Pero evidentemente, este aumento de latitud tiene un límite, que viene fijado cuando el ruido originado en la fotocélula por el primer efecto comienza a ser predominante sobre el de agitación térmica desarrollado en la carga.

Como el efecto de amplificación de la fotocélula no sólo se realiza para la señal a reproducir, sino también para el ruido producido por la ionización, en general puede decirse que la relación Señal/Ruido es más ventajosa en las fotocélulas de vacío que en las de gas, y por ello, cuando se busca una gran latitud de volumen, debe acudirse a las primeras; la figura 255 nos muestra cómo varía la citada relación para distintos flujos incidentes para fotocélulas típicas RCA de las dos clases.

Comparación de los dos tipos de células. Una comparación de los dos tipos de células por sus características de ánodo muestra que para muy grandes valores de la resistencia de carga correspondiente a iguales flujos de luz en cátodo, el comportamiento de las dos clases de células es casi idéntico, porque la sensibilidad de las de gas se aproxima a la de las de vacío para bajas tensiones de ánodo. Cuando R_g es infinito, los cálculos de la tensión de salida y deformación se hacen a lo largo de una línea de carga correspondiente solamente a R_L (fig. 252 bis).

Para las fotocélulas de gas que trabajan a 90 V, la máxima tensión de salida será menor de $\frac{90}{2} = 45$ V.

Para las células de vacío, la tensión máxima de alimentación de ánodo suele ser de unos 500 V. Para obtener la máxima salida de tensión, con luz modulada, es preciso ajustar la tensión de ánodo bajo condiciones estáticas, a un valor de aproximadamente la mitad de la tensión de alimentación de ánodo, con lo que se puede llegar a un valor de la tensión modulada de cerca de 250 V en crestas.

De la misma discusión se deduce que cuando se aplican a ambos tipos de fotocélulas los respectivos máximos voltajes de ánodo y se aumenta la carga de la de vacío hasta que la tensión mínima instantánea de ánodo $E_{\text{mín.}}$ es la misma para ambos tipos, la sensibilidad en voltaje de la célula de vacío puede ser mucho más alta que la de gas. En el caso límite de que la máxima tensión de salida se obtiene de cada tipo para el mismo valor del flujo de luz incidente, la sensibilidad en voltaje de la célula de vacío es aproximadamente $\frac{250}{90} = 2{,}7$ veces la de la fotocélula de gas.

Los díodos rectificadores

Después de estas ligeras ideas que nos permitirán comprender el trabajo de las fotocélulas en la cabeza sonora o reproductor de banda, vamos a dar una idea somera de los rectificadores díodos, muy utilizados como medio de alimentación de los circuitos del amplificador y para cargar baterías en algunos equipos que utilizan tensiones continuas bajas para excitación de altavoces o para caldeo de filamentos de las válvulas tríodos que llevan en los amplificadores y aun para alimentar excitadoras; ello nos servirá, además, de paso preliminar en el estudio de tríodos, pentodos y, en general, de todos los tipos de válvulas que llevan varios electrodos.

Los díodos son válvulas o lámparas de dos electrodos, y constituyen una aplicación del fenómeno de emisión termoiónica de que hemos hablado, combinado a veces con el de la ionización por choque. Al igual que las fotocélulas, pueden ser de vacío o en el seno de un gas (argón en el caso de las válvulas Tungar, o mercurio en forma de vapor por efecto de la temperatura). En este tipo de lámparas, como en las de varios electrodos que estudiaremos después, puede ocurrir que el filamento encargado de emitir los electrones se caliente por el efecto Joule al pasar por él una corriente, en cuyo caso él mismo constituye el cátodo, o bien, como sucede en la mayoría de los de vacío, que el cátodo emisor de electrones esté formado por un depósito de metales alcalinos que, colocado en una vaina, envuelve un filamento calentador por el que pasa la corriente de calefacción que eleva por radiación térmica la temperatura de la vaina-cátodo para que se realice la emisión de electrones; se llaman por eso de caldeo indirecto. Generalmente están constituídos por una ampolla de vidrio dentro de la cual se ha hecho el vacío o se encuentran vestigios de gas o mercurio en contacto con su vapor a una presión que oscila entre 1 y 30 μ, y en la que se encuentran el cátodo y filamento de caldeo, cuando lo llevan, y un ánodo (fig. 256).

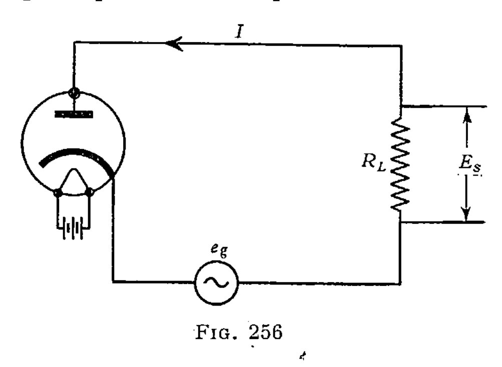


FIG. 256

Para comprender su funcionamiento como rectificador, imaginemos que un generador de tensión alterna sinusoidal está intercalado en el circuito entre cátodo y ánodo, y en serie con él se encuentra la impedancia de utilización. Entonces, durante las semiondas positivas del generador, es decir, las que hacen el ánodo positivo respecto al cátodo (a mayor tensión el ánodo), y supuesto el cátodo calentado, éste emite electrones que son captados por el ánodo y se efectúa un paso de corriente electrónica entre ambos, que viene incrementada por el efecto de ionización de los gases o vapores intercalados entre ambos electrodos, debido al choque de sus moléculas con los citados electrones, ahora acelerados por el ánodo; cuando se invierte el sentido de la tensión desarrollada por el generador de alterna e_g, esos electrones son rechazados por el ánodo y ninguna corriente pasa entre ambos electrodos, quedando interrumpida la misma. Ese paso de corriente electrónica origina en la impedancia de carga una caída de tensión que puede utilizarse con diversas finalidades; la figura 257 da una idea de la tensión rectificada obtenida a la salida de la válvula.

No todos los electrones emitidos por el cátodo cuando su tensión es inferior a la del ánodo, son captados por éste, pues una vez que se inicia el flujo de electrones, y mientras caminan del cátodo a la placa

o ánodo, forman una especie de nube o *carga espacial*, que por tener naturaleza eléctrica negativa repele a los electrones que emite posteriormente el cátodo y que no lleven velocidad suficiente para vencer esa resistencia y alcanzar la placa; la concentración en electrones de esa nube depende de la temperatura del cátodo y de la tensión de ánodo, siendo tanto menor cuanto mayor sea esa tensión. Igual que para las fotocélulas, existe aquí una *corriente de saturación* que corresponde a la captación por el ánodo de todos los electrones que para esa temperatura emite el cátodo, y por mucho que se aumente la tensión de ánodo no crece la corriente termoiónica; sin embargo, los rectificadores trabajan siempre por debajo de esa corriente de saturación que lleva consigo una destrucción del cátodo o de su capa termoemisiva.

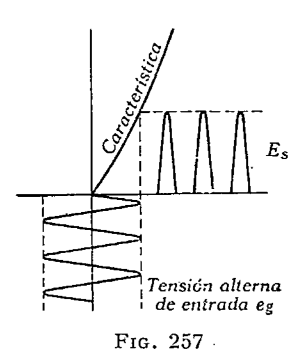


FIG. 257

Con el fin de reducir en lo posible esa carga espacial que reduce la corriente, no hay más que dos recursos: reducir la distancia entre ánodo y cátodo en que se produce —hasta 0,05 mm como en la tan conocida rectificadora 25 Z 5 de los radiorreceptores de radiodifusión—, o bien utilizar el efecto de ionización de gases o vapores; los iones producidos por la rotura en el choque son eléctricamente positivos, y tienden a anular esa carga espacial, al mismo tiempo que aumentan la corriente electrónica; tal sucede con el argón en las lámparas Tungar. En el caso de vapores de mercurio (Hg), la tensión de ánodo no debe exceder nunca de unos 15 a 20 V, porque se ha comprobado que dentro de estas tensiones se realiza la ionización de su vapor en las condiciones normales de trabajo de esta clase de rectificadora, y que a una tensión de unos 22 V el bombardeo del cátodo por los iones procedentes de la rotura de las moléculas de vapor es suficiente para destrozar dicho cátodo (Langmuir), e incluso aunque la tensión no llegue a tal valor, este proceso de desintegración del cátodo se efectúa, aunque más lentamente, en casi todos los rectificadores de gas. Para las lámparas de vapor de Hg, la tensión de ánodo debe aplicarse con un cierto retraso especificado por el fabricante, con respecto al encendido del cátodo, cuyo tiempo es indispensable para que el cátodo tome la temperatura necesaria de trabajo y para que el vapor condensado de Hg adquiera la temperatura mínima para las condiciones de trabajo que se especifiquen por el constructor. Esa temperatura depende de la temperatura ambiente (por ello, estas válvulas deben estar bien ventiladas) y de la tensión del ánodo; si la temperatura es inferior a la especificada, entonces hay necesidad de elevar la tensión del ánodo para que empiece a funcionar, lo cual va en perjuicio, por lo que dijimos antes, de la duración de la válvula; por el contrario, si la temperatura de vapor es superior a la indicada, puede trabajar ya con menor tensión de la señalada por el constructor, lo que alarga mucho

la vida de la lámpara, pero, en cambio, queda reducida la tensión inversa de cresta, de que hablaremos a su tiempo, y con ello el rendimiento de la válvula. Esta temperatura puede medirse con un termopar, o con un termómetro sujeto con masilla cerca de la base de la ampolla. Todas las lámparas de Hg toman una luminescencia blancoviolácea cuya extensión depende de la corriente de utilización.

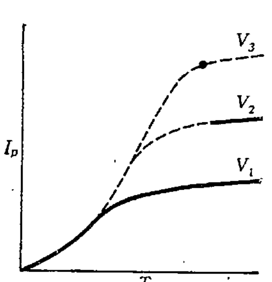


Fig. 258. Representación de la relación $Ip = F(T)$

Características de las válvulas díodos. De un modo correlativo a las fotocélulas, la corriente electrónica del díodo depende de la tensión de ánodo y de la temperatura del filamento, es decir:

$$I_p = f(V_p \cdot T),$$

y como allí podemos determinar cómo depende de cada una de ellas permaneciendo la otra constante. La figura 258 nos muestra cómo depende la corriente por centímetro cuadrado de la temperatura en grados Kelvin; Richardson y posteriormente Dushman han encontrado la expresión $I = AT^2 e^{-b/T}$ que relaciona ambas magnitudes, fundándose el primero en consideraciones termodinámicas de vaporización, a cuyo fenómeno puede asimilarse la emisión termoiónica en primera aproximación, mientras que el segundo ha llegado a la expresión anterior teniendo en cuenta la teoría de los calores específicos, más exacta que la anterior; esta característica tiene un interés relativo en cuanto al funcionamiento de las válvulas de vacío. Más interesante es la otra dada en la figura 259, muy parecida a la anterior y que Langmuir ha mostrado puede representarse en gran aproximación y antes de la saturación por la expresión

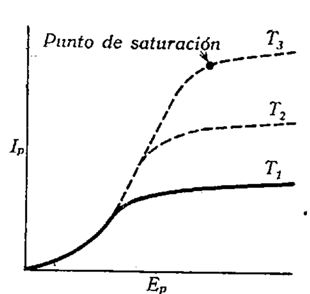


Fig. 259. Representación de la relación $Ip = f(Ep)$

$$I_P = KV_P{}^{3/2},$$

en la que K es una constante que depende de las características geométricas del tubo (electrodos y dimensiones de los mismos); como se ve, hay una región muy curvada en la parte inferior y luego otra sensiblemente recta, hasta que finalmente se alcanza la saturación.

Para las válvulas de Hg, esta característica es, en cambio, de la forma que se ve en la figura 260; antes de alcanzar la tensión de ionización, apenas hay paso de corriente; pero cuando se alcanza esta tensión de unos 15 V, la corriente crece bruscamente en un tiempo

muy pequeño, debido a la ionización del vapor, y si todavía crece más, se llega como antes a la saturación, y a los 22 V sobreviene la desintegración del cátodo por bombardeo iónico.

Igual que para las fotocélulas, se puede definir aquí la resistencia interior de la válvula por $R_i = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_o}$, y es en este parámetro donde radica la diferencia esencial entre las dos clases de díodos; mientras para las de vacío éste es relativamente grande y variable con las condiciones de trabajo, es decir, con la corriente de consumo, para las de vapor de Hg y Tungar esta resistencia interior es sensiblemente constante e inpependiente de dicha corriente. Esto tiene como consecuencia que la caída de tensión dentro del díodo es muy variable para los de vacío, y, en cambio, sensiblemente constante y entre los 10 a 15 V para las de gas, lo que les hace muy ventajosas por tener una *regulación* (1) mucho mejor.

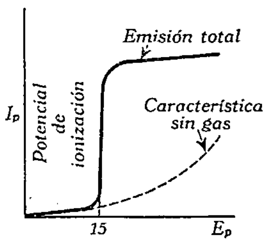


FIG. 260. Característica de un díodo rectificador de vapor de Hg-cátodo calentado

El crecimiento brusco de la corriente en los díodos de Hg se realiza cada vez que el ánodo se hace positivo con respecto al cátodo, y se alcanza esa tensión de ionización; de modo que estos saltos bruscos de corriente pueden excitar por choque los circuitos inmediatos, produciendo ruidos y descargas u oscilaciones amortiguadas que perturban, y que se evitan pantalleándolos y poniendo choques en el circuito de utilización.

En la figura 256 hemos supuesto un generador de corriente alterna, pero por lo general éste no va directamente colocado allí, sino que se conecta el secundario de un transformador, cuyo primario está conectado a la red o a otro generador adecuado, haciendo así independientes ambos generadores de corriente alterna y continua; por otra parte, con ese mismo montaje, sólo se utiliza en la impedancia de carga una semionda de la onda completa que constituye la tensión alterna del generador y la corriente es más bien intermitente en R_L; inmediatamente se ocurre que disponiendo otro díodo en paralelo sobre la impedancia de carga y con los electrodos concordantes, tal como se indica en la figura 261 *a*, se podrán utilizar las dos semiondas una por cada díodo, y esto es lo corriente en la práctica, pero con un solo tubo que lleva un solo cátodo y dos ánodos, y a los cuales se les llama *duodíodos* o rectificador de onda completa, por contraposición al anterior de

---

(1) Suele llamarse *regulación de tensión*, o simplemente regulación, el incremento de tensión que se tiene por el paso de la corriente desde un valor determinado al valor cero, expresado ese incremento en % de la tensión a plena carga (o en vacío para los rectificadores); así, si un rectificador en vacío da 1200 V y con una cierta carga da 900 V, la regulación de dicho rectificador vale $\frac{1200 - 900}{1200} = 25\,\%$. Para nuestro caso, una buena regulación no debe exceder del 10 %, y es mala si alcanza del 15 al 50 %.

semionda (fig. 261 *b*). Si en lugar de conectar los dos díodos en paralelo sobre la impedancia de carga con los electrodos concordantes como antes, tienen estos electrodos invertidos como en la figura 262, se obtiene lo que se llama un *doblador de voltaje,* porque permite con el mismo valor de la tensión de entrada alterna que en los casos anteriores, doble tensión rectificada a la salida (1). Existe, por último, el montaje en puente, muy utilizado especialmente en los rectificadores llamados *secos,* que también se puede utilizar en díodos con ciertas precauciones, pero aquí no nos ocuparemos de ellos ya que sólo tratamos de dar las ideas indispensables para el estudio de tríodos.

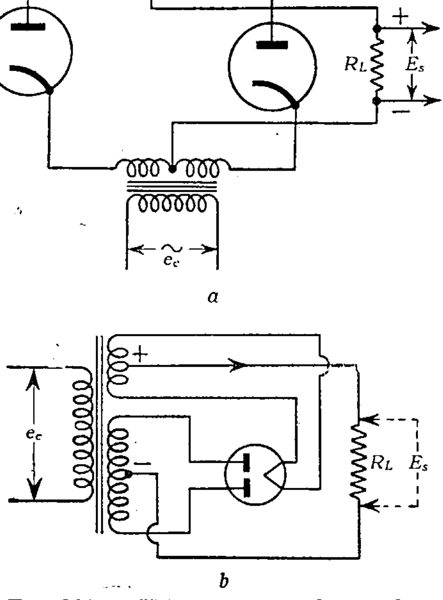


Fig. 261. *a*. Utilización de onda completa, mediante dos díodos. *b*. Ídem con un solo díodo y transformador de entrada y caldeo de filamento

Tríodos

Colocando una rejilla de alambre o uno de pequeño diámetro arrollado en hélice, en el espacio comprendido entre cátodo y ánodo de un díodo de vacío, se obtienen las válvulas llamadas tríodos, en las cuales es posible gobernar sin apenas inercia y con muy poca energía aplicada a esa rejilla, tensiones o corrientes alternativas muy grandes, sobre el circuito de placa, de modo que sirvan finalidades distintas.

En ellos, la corriente electrónica depende no sólo de la tensión del ánodo como en los díodos, sino también de la tensión que toma la rejilla, de modo que

$$I_p = f\,(E_p \cdot E_g),$$

donde E_g y E_p son los valores continuos de las tensiones de rejilla y de placa, e I_p la corriente correspondiente de placa.

Características. Como siempre, podremos suponer fija una de las dos variables y considerar como varia la corriente con la otra tensión, obteniéndose así dos tipos de características *estáticas,* es decir, obtenidas con potenciales constantes y continuos en placa o rejilla: las de *placa* y las de *rejilla,* llamadas estas últimas también de transferencia o de mando, porque indican cómo influye el circuito de rejilla en el de placa.

(1) Con tal de montar condensadores en forma adecuada.

Las últimas (fig. 263), que representan la expresión $I_p = F_1 (E_g)$, para un valor constante de E_p correspondiente a cada curva de la familia, como se ve, tienen un codo en la parte inferior de las mismas y, después, son sensiblemente rectilíneas en casi toda su longitud útil, pues nunca se trabaja con ellas en la parte elevada de las mismas en las que interviene la corriente de saturación, estando tanto más desplazadas a la izquierda cuanto más elevada sea la tensión de placa, que constituye el parámetro de cada curva de la familia.

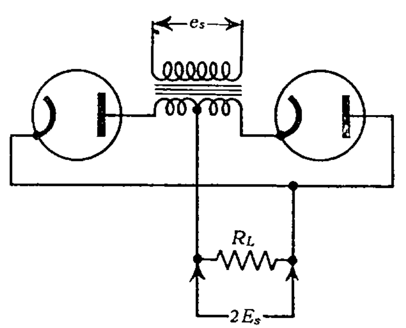


FIG. 262. Montaje doblador de voltaje con dos diodos

Las características de placa (fig. 264) son la representación de $I_p = F_2 (E_p)$, en las que cada curva tiene un valor de E_g constante, que es lo que constituye aquí el parámetro de cada curva de la familia; presentan también una gran parte de su longitud rectilínea y están, por lo general, igualmente espaciadas y sensiblemente paralelas, para incrementos iguales de su parámetro o tensión de rejilla; son las más frecuentemente utilizadas en casi todos los usos de los tríodos.

Las características *dinámicas* son las obtenidas aplicando o superponiendo tensiones alternativas de rejilla a las tensiones continuas aplicadas de antemano a los distintos electrodos de los tríodos, y tienen mucho interés porque revelan en realidad las condiciones según las cuales se comporta un tríodo en las condiciones reales de su trabajo.

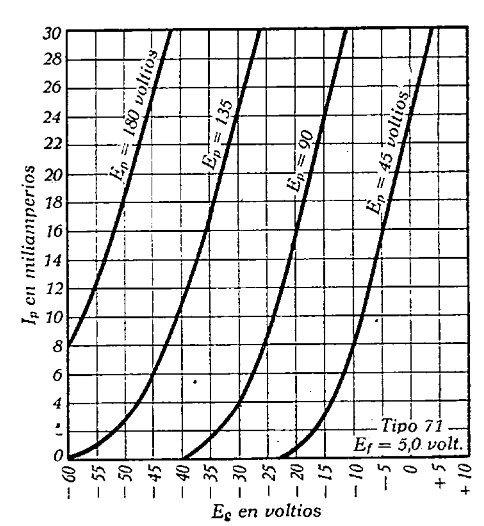


FIG. 263. Características estáticas de mando o de rejilla. Nótese que al aumentar la tensión de placa la curva se desplaza a la izquierda

Parámetros geométricos o característicos de los tríodos. Supongamos (fig. 265) que entre cátodo y placa de un díodo existe una tensión de 100 V, y que la distancia entre ambos sea de 4 mm; esta tensión se reparte uniformemente a lo largo de esa distancia a razón de $\frac{100}{4} = 25$ V por mm, o, empleando el lenguaje de los físicos, dire-

mos que el *gradiente* de esa tensión es de 25 V por mm, lo que representa que en la superficie del cátodo los electrones se hallan sometidos a la acción de un gradiente de 25 V por mm. Supongamos que ahora intercalamos una rejilla a la distancia de 2 mm del cátodo, y que le aplicamos una tensión de ± 10 V, lo que originará, prescindiendo de la acción de la placa, un gradiente entre cátodo y rejilla de $\frac{\pm 10}{2} = 5$ V por mm; si ahora suponemos que ambos electrodos actúan sobre los electrones con sus respectivos gradientes, éstos se sumarán en el espacio cátodo, rejilla, y los electrones se encontrarán acelerados por el efecto del gradiente que vale, respectivamente, $25 - 5 = 20$ y $25 + 5 = 30$ V por mm. Para lograr ese mismo gradiente en el cátodo, suponiendo que la rejilla no tiene tensión alguna, y variando la tensión del ánodo, haría falta que la tensión de éste valiese, respectivamente, 80 y 120 V, es decir, que experimente incrementos de ± 20 V respectivamente, lo que quiere decir que un incremento de 20 V en placa produce el mismo efecto que uno de 5 en la rejilla, es decir, que la relación de incrementos de tensión en placa y rejilla que producen el mismo gradiente y, por tanto, el mismo efecto sobre la corriente de emisión del cátodo, vale $\frac{20}{5} = 4$. Si sin modificar las distancias relativas de los electrodos ni demás dimensiones aplicamos tensiones distintas de las indicadas anteriormente, siempre encontraremos que para producir el mismo gradiente entre cátodo y rejilla hace falta que los incrementos que reciban cada uno (placa y rejilla) separadamente tengan que estar en esa misma relación 4, y, por tanto, y refiriéndonos al caso anterior, para que la corriente no varíe hará falta aumentar la tensión de rejilla en 5 V, al disminuir la tensión de placa en 20.

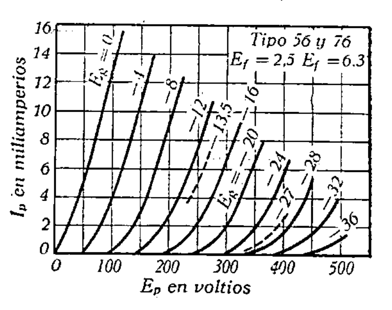


FIG. 264. Características estáticas de placa. A medida que la Eg se hace más negativa, las curvas se desplazan a la derecha

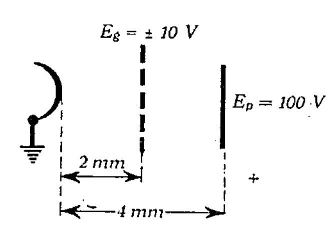


FIG. 265

En definitiva, y para un tipo dado de tríodo, un cambio en la tensión de rejilla de ΔE_g voltios tiene el mismo efecto que un cambio de $\frac{\Delta E_p}{\mu}$ voltios en la tensión de placa; a este número μ cambiado de signo, que, como vemos, sólo depende de las características geométricas del tubo tríodo, se le llama *factor de amplificación en voltios* del tríodo, y la razón de tomarlo con signo menos es que siendo generalmente negativas las tensiones de rejilla, los incrementos de placa y rejilla

se cuentan en sentidos opuestos. El factor de amplificación es, pues, $\mu = -\frac{\Delta E_p}{\Delta E_g}$ a su inversa $D = \frac{1}{\mu}$ le llaman los alemanes *transparencia* y expresa ΔE_g en tanto por ciento de ΔE_p.

Puesto que ΔE_g produce el mismo efecto que $\frac{\Delta E_p}{\mu}$, cuando varíen sinmultáneamete ambas tensiones, el efecto será la suma de ambos, y, por tanto, el tríodo puede reemplazarse por un díodo cuya tensión de ánodo fuera

$$E_c = E_g + \frac{E_p}{\mu}$$

a esta tensión se le llama *tensión compuesta.* Claro está que si ésta es nula, no habrá emisión termoiónica apreciable; entonces es $E_g = -\frac{E_p}{\mu}$ y a esta tensión de rejilla se le llama *tensión de corte* de rejilla [1].

Cuando el tríodo trabaja en régimen alternativo, es decir, cuando a la tensión continua de rejilla E_g, llamada *tensión de polarización,* se le superpone una tensión alternativa, interesa conocer sobre los puntos de las características estáticas, dadas por los fabricantes, definidos por los dos valores de corriente y tensión del otro electrodo, cuál es la pendiente de la tangente a la curva correspondiente en ese punto y se definen así otros dos parámetros geométricos que, como μ, sólo dependen de las dimensiones y posición de los electrodos.

Se llama *transconductancia, conductancia mutua o pendiente* a la pendiente de la característica de rejilla (fig. 263) en el punto antes indicado, y viene definida por

$$G_m = \frac{\Delta I_p}{\Delta E_g}$$

se expresa en microamperios por voltio o en micromhos (un mho es una unidad de conductancia) si un cambio de 0,5 V en placa produce un cambio en la corriente de placa de 0,001 A, con todas las otras tensiones constantes, se dice que la conductancia mutua vale

$$\frac{0{,}001}{0{,}5} = 0{,}002 \text{ mhos o, } 2 \text{ mA/V}$$

De igual modo, la pendiente determinada en la característica de placa de la figura 264 nos determina otro parámetro, que es la recíproca de esa pendiente; se llama *resistencia interior* de la lámpara, y vale

$$R_i = \frac{\Delta E_p}{\Delta I_p}$$

(1) El que esta tensión de corte sea pequeña o grande tiene mucho interés en algunos casos y constituye una base de clasificación de válvulas, según su uso.

representa la resistencia eléctrica que opone el espacio cátodo-placa al paso del flujo de electrones y se mide naturalmente en ohmios; así, si un cambio de 1 V en placa produce una variación en el valor de la corriente de placa de 0,1 mA, la resistencia interior vale 10 000 Ω.

Estos tres parámetros no son entre sí independientes, sino que entre ellos existe la relación siguiente:

$$\frac{\Delta I_p}{\Delta E_g} = \frac{\Delta E_p}{\Delta E_g} : \frac{\Delta E_b}{\Delta I_p}; \quad \text{es decir:} \quad G_m = \frac{\mu}{R_i}$$

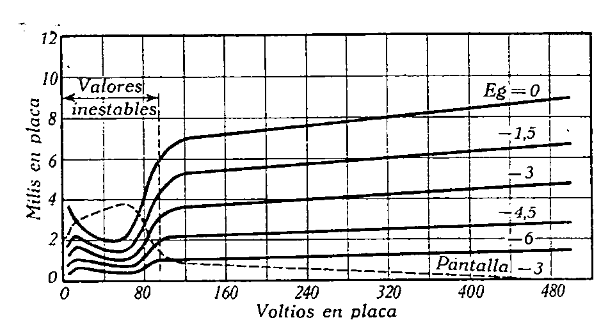
Tetrodos

La rejilla, placa y cátodo de un tríodo forman un sistema electrostático; en él cada electrodo actúa como la placa de un condensador, determinando capacidades entre cada dos; de ellas, la más importante es la de rejilla-placa, y actúa como un acoplamiento entre el circuito de entrada de la válvula formado por cátodo-rejilla y el circuito de salida cátodo-placa; este acoplamiento es tanto más eficaz cuanto mayor sea la frecuencia de la tensión aplicada a la rejilla en el régimen de trabajo, y puede determinar perturbaciones, tales como una oscilación del amplificador, en el que la válvula se encuentra intercalada, y una inestabilidad muy grande en cuanto a sus características; el efecto es todavía más notable en radiofrecuencias, por lo que tal capacidad conviene reducirla todo lo posible, en muchos casos. Esto se consigue intercalando entre rejilla y placa una segunda rejilla que actúa como una pantalla electrostática entre placa y rejilla y que por eso se llama *rejilla-pantalla*, y las válvulas así logradas se llaman *tetrodos*.

La eficacia de esta pantalla se incrementa conectando un condensador de paso entre ella y el cátodo, y de este modo se reduce la capacidad rejilla-placa, que suele alcanzar en los tríodos el valor de 8 picofaradios (un picofaradio = 1 $\mu\mu f$), a menos de 0,01 picofaradio. Esta pantalla produce también el efecto de hacer independiente en la práctica la corriente de placa, de la tensión de placa, en toda la región rectilínea de la característica de un tetrodo (fig. 266), y en cuya región se comprende fácilmente — después de la definición de la resistencia interior — que aquí tiene la misma definición, que ésta toma valores muy grandes.

Para comprender la independencia de la corriente de la tensión de placa, basta fijarse en que estando ligada la rejilla-pantalla, como se hace normalmente, a un potencial positivo, atraerá los electrones del cátodo, y muchos de ellos pasan a placa por efecto de su velocidad adquirida y de los grandes espacios entre sus mallas; pero, evidentemente, la emisión en el cátodo sólo dependerá de la acción de rejilla y rejilla-pantalla, pues ésta es una verdadera pantalla para la tensión de placa y, por tanto, la placa no tiene apenas influencia sobre

la corriente, que se halla ahora casi exclusivamente gobernada por la tensión de pantalla. La parte marcada en la figura 226 como inestable, se explica porque la corriente se reparte entre la pantalla y la placa, mientras la tensión de placa no es superior a la tensión de rejilla pantalla, y la pendiente descendente que se observa en la parte ines-



Tipo 24-A. $E_f = 2{,}5$ V. $E_p = 90$ voltios

FIG. 266. Características de placa del tetrodo 24-A

table de las características, se debe al efecto de emisión secundaria de la placa por los electrones que chocan con ella; a medida que en esta región aumenta la tensión de placa, aumenta el número de electrones secundarios por cada uno que choca, los cuales van ahora a la pantalla.

Existen aquí dos parámetros μ; uno que es verdaderamente parámetro geométrico definido por (1)

$$\mu_p = -\frac{\Delta E_p'}{\Delta E_g} \text{ (para } I_p' + I_p = \text{constante)},$$

que nos da la relación de equivalencia de incrementos entre las tensiones de rejilla y de pantalla, para que la corriente *total* no se altere, y se le llama *factor de amplificación de corte* porque para él, como antes para los tríodos, se verifica

$$E_g = -\frac{E_p'}{\mu_p}$$

que nos da las tensiones en rejilla y pantalla para la anulación de la corriente.

El otro, que no es propiamente parámetro geométrico, sino que depende de las tensiones de los electrodos, se define por

$$\mu = -\frac{\Delta E_p}{\Delta E_g} \text{ (para } I_p = \text{constante)}.$$

(1) El subíndice p' se refiere a la pantalla.

Dado que en las partes rectas de las características la tensión de placa apenas influye en la corriente, el factor de amplificación μ toma valores muy grandes, con lo que la tensión de rejilla actuará fuertemente en dicha corriente de placa. Subsiste aquí la relación entre los tres parámetros poco antes definidos, y las características de rejilla son sensiblemente iguales a las de los tríodos.

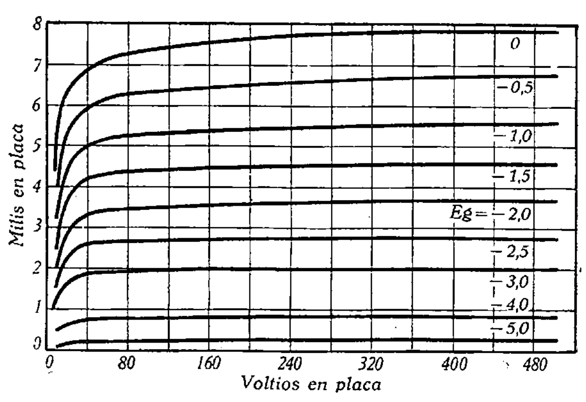


FIG. 267. Características del pentodo 6-J-7 (Compárense con los del tetrodo de la figura 266 y con las del tríodo figura 264).

Pentodos

Como hemos visto, cuando la pantalla está, como es el caso, a una tensión positiva, los electrones secundarios emitidos por la placa son atraídos por aquélla, y el resultado es una disminución de la corriente de placa; ello limita la amplitud de variación de la corriente, porque cuando se alcance las regiones marcadas como inestables, en la figura 266 se producen deformaciones. Para evitar esto se coloca otra tercera rejilla llamada *supresora*, entre la pantalla y la placa, y se la da la tensión del cátodo; esta rejilla retarda los electrones que llegan a la pantalla, impidiendo la emisión secundaria en una gran medida, y de este modo las características de placa adquieren el aspecto de la figura 267. Existen aquí, y por las mismas razones, *una amplificación muy grande y una resistencia interior también muy grande*. Como la potencia de salida de la válvula es tanto mayor cuanto mayor sea la tensión de placa, en los pentodos de salida en los que, según se desprende de las características, aquella tensión puede oscilar con grandes amplitudes, podrá ser más grande que en los tríodos y tetrodos. De otra parte, como el factor de amplificación toma valores grandes en estas válvulas llamadas *pentodos*, también se podrá lograr gran amplificación de tensión con tensiones de placa relativamente bajas. Son extremadamente *sensibles*, es decir, que requieren muy poca potencia en rejilla, para dar grandes potencias en placa, comparativamente con los tríodos, pero, en cambio, dan mayor deformación.

Cuando el voltaje de placa de un pentodo es muy bajo, y particularmente cuando la corriente total es muy grande al mismo tiempo, el funcionamiento normal del pentodo se modifica, porque la placa no es capaz de producir suficiente campo electrostático en el lado de

la pantalla frente a la supresora, para atraer todos los electrones tan de prisa como van llegando; el resultado es que se forma una carga espacial en frente de la supresora, como se ve en la figura 268, a la cual se le llama *cátodo virtual*, y cuando la acumulación es suficiente, actúa en todos los aspectos como la carga espacial que rodea al cátodo verdadero. Resulta así que este cátodo virtual, juntamente con la placa y la rejilla supresora, forman el equivalente de un tríodo en el

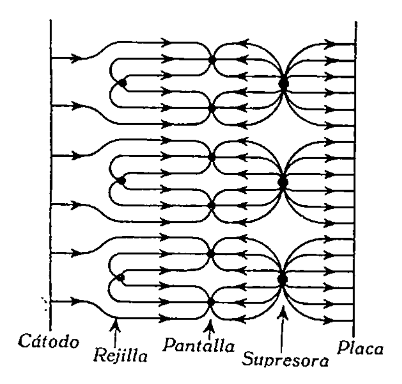


Diagrama de los campos existentes en un pentodo; las flechas indican la dirección de aceleración de electrones

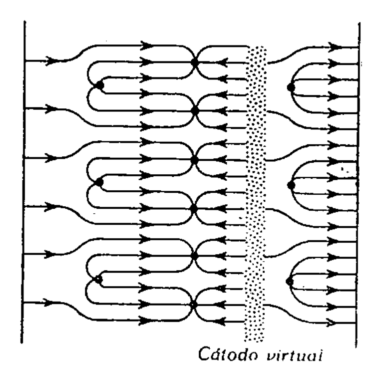


Diagrama de las líneas de fuerza del campo electrostático de un pentodo, con formación del cátodo virtual

FIG. 268

que la rejilla es la supresora; el número de electrones que alcanzan la placa en tales condiciones es función únicamente de las tensiones de placa y supresora y tiende a hacerse independiente de los potenciales de los otros electrodos, con tal de que el cátodo virtual tenga suficiente carga espacial. El exceso de electrones que la placa no es capaz de atraer, de ese cátodo virtual, vuelven al cátodo real y a la pantalla.

Otro tipo de pentodos, muy importante actualmente, es el que se agrupa bajo el nombre de válvulas de *haces o barrera electrónica*, como las 6L6, 25L6, 6V6, etc., cuya diferencia en cuanto a las características de placa se aprecian en la figura 269. La característica fundamental de este tipo de válvulas es que en ellas se ha conseguido atenuar el 3.° armónico de la deformación a cuenta del 2.°, que siempre puede ser anulado por el montaje en contrafase, consiguiéndose así una gran ventaja en audiofrecuencia. Ello se debe al pico más agudo de su característica, tal como se ve en la figura 269.

Función amplificadora de la válvula y circuito equivalente. Su papel amplificador procede de la propiedad que tiene la rejilla de no captar electrones, cuando su tensión es negativa con respecto al cátodo; pero, en cambio, gobernar, mediante los cambios de su tensión, las

variaciones de corriente en placa, sin apenas consumo de energía. La eficiencia con la cual gobierna esa corriente depende de la relación antes encontrada $\Delta E_p = -\mu \Delta E_g$; así resulta que si $\mu = 1200$, una variación relativamente pequeña de 3 V en rejilla, por ejemplo, tendrá los efectos sobre la corriente de placa equivalente a una variación de la tensión de placa de $3 \cdot 1200 = 3600$ V. Estos cambios en la corriente de placa son suficientemente grandes para producir variaciones relativamente grandes en la corriente de ánodo, las cuales recogidas en una carga Z_L originan caídas de tensión suficientemente grandes para que la energía correspondiente a tales variaciones sea muy grande frente a la prácticamente nula, que se puso en juego, con la señal que ha originado las de la rejilla.

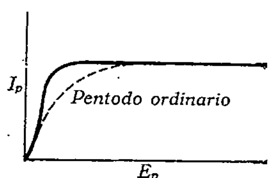


Fig. 269. Diferencia entre las características de un pentodo y una válvula de haz electrónico

El que esta energía recogida en placa, sea más o menos fiel reproducción de la aplicada en rejilla, depende de las condiciones de trabajo de la válvula; más concretamente, de que la rejilla no sea nunca positiva, con respecto al cátodo, y de la medida en la cual las características estáticas y dinámicas de la válvula pueden ser sustituídas por rectas; la mayor o menor desviación de ambas condiciones es el origen de las distintas deformaciones que se presentan en un amplificador. Es claro que si suponemos en primera aproximación rectas tales características, los parámetros característicos en la región del plano dentro de la cual es admisible esa sustitución, serán constantes, independientemente del punto de la característica en que se determinen, y el estudio de las condiciones de trabajo será mucho más sencillo. Es dentro de estas hipótesis simplificadoras en donde tiene aplicación e interés el teorema del *circuito equivalente* de una válvula, que puede presentar dos aspectos igualmente válidos aunque de aspecto distinto.

La figura 270 representa el modo normal de conectar una válvula para trabajar como amplificadora de una señal alternativa e aplicada a su rejilla, superpuesta a la continua de polarización E_g, que ahora no nos interesa. Este incremento en la tensión de rejilla $\Delta E_g = e$ produce, según hemos dicho, un cambio en la corriente de ánodo también alternativo $\Delta I_p = i_p$, el cual, a su vez, origina en la carga Z_L una caída de tensión dada por $-i_p Z_L$; con ello, la tensión de placa inicial E_p se habrá cambiado en $E_p - i_p Z_L$, y, por consiguiente, el incremento de la corriente de placa i_p estará motivada no sólo por el incremento de rejilla $\Delta E_g = e$, que equivale a un cambio $\Delta_1 E_p = -\mu \cdot e$ en la tensión de placa, sino también por la variación $\Delta_2 E_p = -i_p Z_L$ de la misma tensión de placa; el incremento combinado de placa será, pues, $\Delta E_p = (\Delta_1 + \Delta_2) E_p = -(\mu e + i_p Z_L)$; por tanto, según la definición de resistencia interior de la válvula: $R_i = \dfrac{\Delta E_p}{\Delta I_p} = -\dfrac{\mu e + i_p Z_L}{i_p}$

de donde se saca fácilmente:

$$i_p = \frac{-\mu e}{R_i + Z_L}$$

que es una de las relaciones buscadas. Ahora bien: esta ecuación nos dice que la variación de la corriente en placa es la de un circuito que

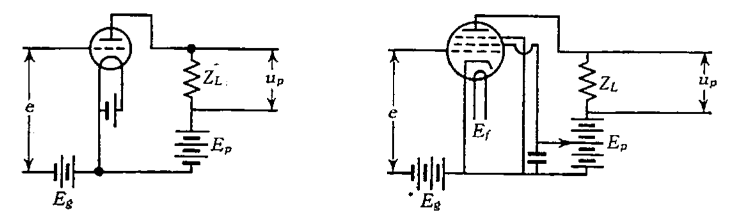


FIG. 270. Montaje en amplificadora de un tríodo o pentodo

siga la ley de Ohm con una *tensión constante* de valor $-\mu e$, una resistencia interior R_i y una resistencia exterior Z_L (fig. 271 *a*), y, por tanto, para los efectos de la corriente que varía en el circuito de placa

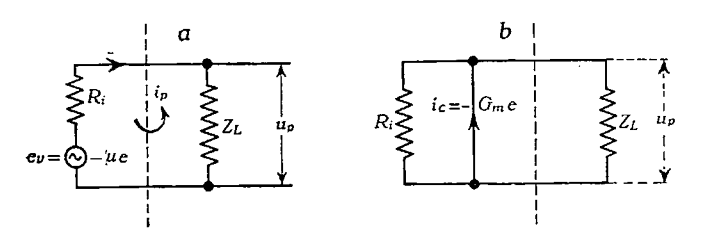


FIG. 271. Dos formas del circuito equivalente a la figura 270

de válvula, ésta puede reemplazarse por tal circuito, mucho más cómodo de manejar.

Si queremos calcular la tensión en la carga Z_L, bastará multiplicar la anterior por Z_L, y así, llamando u_p dicha tensión, se tiene:

$$u_p = i_p Z_L = -\frac{\mu}{R_i} e \frac{Z_L R_i}{Z_L + R_i} \qquad u_p = -e\, G_m \frac{Z_L R_i}{Z_L + R_i}$$

que equivale a un circuito como el de la figura 271 *b*, en cuya rama central circula una *corriente constante* de valor $-eG_m$. La tensión $e_v = -\mu e$ la llaman los alemanes *tensión de vacío*, porque, en efecto, sería la tensión en vacío, es decir, con $Z_L = \infty$ de un generador de fuerza

electromotriz $-\mu e$ y resistencia interior R_i, mientras que a la corriente $i_c = -e G_m$ le llaman *corriente de cortocircuito*, es decir, con $Z_L = 0$, porque también sería la corriente del mismo generador, siempre que exista la relación (1) $G_m = \frac{\mu}{R_i}$

Ambos circuitos son equivalentes, pero como quiera que en los tetrodos y pentodos μ y R_i toman valores muy elevados, el circuito con corriente constante se adapta mejor a los parámetros de tetrodos y pentodos, mientras que el otro es más útil con tríodos (2).

Otra observación particularmente interesante es que ambas expresiones pueden escribirse en la forma:

$$i_p = -e\, G_m \frac{R_i}{R_i + Z_L} \quad , \quad u_p = -e\,\mu \frac{Z_L}{R_i + Z_L},$$

y poniendo ahora:

$$G'_m = G_m \frac{R_i}{R_i + Z_L} \quad \text{y} \quad \mu' = \mu \frac{Z_L}{R_i + Z_L}$$

resultan las:

$$\boxed{i_p = -e\, G_m'} \quad \text{y} \quad \boxed{u_p = -e\,\mu'}$$

con la complementaria

$$\boxed{G'_m = \frac{\mu'}{Z_L}} \qquad (\alpha)$$

Estas tres últimas ecuaciones representan las tres correlativas de las que dan los valores de $e_v = -\mu e$, $i_c = -e G_m$ y $G_m = \frac{\mu}{R_i}$ en su forma primitiva, y equivalen, a los efectos de lo que sucede en la carga Z_L, a reemplazar la **válvula** en cuestión por otra **virtual** cuyos parámetros no sean μ, G_m y R_i, sino μ', G_m' y Z_L; y puesto que aquellas relaciones contienen los tres parámetros geométricos de la válvula que se deducen de las características estáticas de la misma, podremos imaginar ahora reemplazada la lámpara con su carga, por otra en régimen estático, de características tales que a ellas correspondan estos nuevos parámetros. Tienen, además, la ventaja sobre las dos formas del circuito equivalente, de que no necesitamos imaginar ningún circuito, sino calcular la impedancia equivalente, de todas las que se encuen-

(1) Obsérvese que se tiene $i_c = \frac{e_v}{R_i}$

(2) Para tetrodos y pentodos u_p toma la forma $u_p = -e\, G_m\, Z_L$.

tran en el circuito de placa (la cual hemos representado por Z_L), y llevar ese valor a las citadas ecuaciones que dan la expresión de i_p y u_p en función de los nuevos parámetros; tampoco se precisa en este caso la aplicación del teorema de Thevenin de que hablaremos a continuación [1].

Teorema de Thevenin. Todo sistema lineal (es decir, con constantes independientes de la corriente y voltaje) que contenga una o varias f.e.m. y que tenga dos terminales (dipolo), puede sustituirse en esos dos

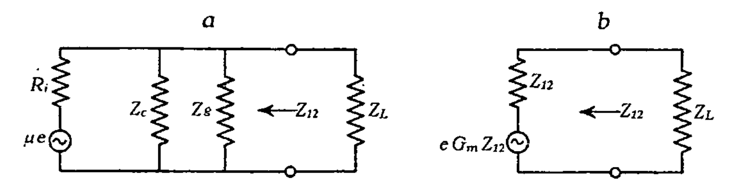


FIG. 272. *b*, Circuito equivalente al *a*, según el teorema de Thevenin

terminales, para toda otra conexión exterior, por un generador equivalente de tensión E igual a la medida entre sus dos terminales y de impedancia Z_{12} igual a la determinada cortocircuitando todas las f.e.m. interiores, y medida en dichos terminales.

Como aplicación de él, y cuya demostración no cabe en esta obra, imaginemos el circuito de la figura 272 *a*, que representa el equivalente a un amplificador; poniendo en corto su f. e. m., la impedancia en las bornas vale

$$Z_{12} = \frac{R_i Z_c Z_g}{R_i Z_c + R_i Z_g + Z_c Z_g}$$

y, por consiguiente, puede ser reemplazada por el de la figura 272 *b*.

En realidad, nuestras expresiones (α) no son otra cosa que la combinación de este teorema con las que dan los parámetros de una lámpara.

---

(1) Esta interpretación de las ecuaciones, y su aplicación a los problemas que se plantean en el uso de válvulas, no ha sido hasta ahora dada, que nosotros sepamos, en ninguna de las obras sobre el asunto, a pesar de la simplificación notable que introduce, pues reduce el caso a un cálculo de impedancias, como veremos en lo sucesivo, lo que no ha dejado de llamarnos la atención, ya que la cosa parece inmediata; naturalmente, su campo de validez es el mismo que el del teorema del circuito equivalente. Las características $i_p = f'(e_g)$ y $i_p = F'(u_p)$, así obtenidas se llaman *características dinámicas* de la válvula, y puesto que siempre $G'_m < G_m$ y $\mu' < \mu$, se comprende que tienen menos pendiente que las estáticas, para las primeras, y para las segundas depende del valor de Z_L respecto a R_i.

XIV. Ideas sobre sistemas de transmisión eléctrica y sus medidas

Elección de unidades

Repetidas veces, en el curso de esta obra, especialmente al tratar de las cuestiones de Acústica y de la Película, hemos visto la necesidad de expresar las distintas formas de energía, bien sea en decibelios o en phons, y la facilidad que en los cambios y transformaciones de aquélla nos daban el uso de tales unidades logarítmicas; ello es debido fundamentalmente a que de un modo casi general, aunque sometido a ciertas limitaciones, las sensaciones recibidas por nosotros a través de los sentidos varían como el logaritmo de la causa excitatriz o estímulo del sentido de que se trate (ley de Weber-Fechner). Esta ley puede comprenderse mejor, para el no versado en matemática, diciendo que si los estímulos crecen como 3, $3^2 = 3 \times 3$, $3^3 = 3 \times 3 \times 3$..., etc., y la sensación correspondiente a un estímulo como 3, es, por ejemplo, 20; la correspondiente a 3^2 es precisamente 2×20; la correspondiente a 3^3 es 3×20, y, en general, la sensación correspondiente al estímulo 3^n es exactamente $n \cdot 20$, o, lo que es igual: cuando se repite n veces *por factor* el estímulo, la sensación queda multiplicada por n, o sea, se repite n veces *por sumando.* Esto sucede con las sensaciones luminosas, las sonoras, etc., con más o menos aproximación, y de aquí el interés que tiene para nosotros esta relación entre las sensaciones y los estímulos. Este interés se pone en evidencia al comparar lo que sucede con el caso corriente de las magnitudes que manejamos usualmente y que no siguen esa ley, sino la de *proporcionalidad;* así, por ejemplo, si tratamos de determinar las caídas de tensión que sobre una misma resistencia originan distintas intensidades de corriente, vemos que si una corriente de 3 A origina en esa resistencia una caída de tensión de 20 V, cuando la corriente sea de $2 \times 3 = 6$ A, la caída de tensión es de $2 \times 20 = 40$ V; cuando sea de 3×3 A, aquella caída es de $3 \times 20 = 60$ V, y, en general, cuando sea de $n \cdot 3$ A, la tensión correspondiente es de $n \cdot 20$ V; es decir, aquí, al repetir la corriente n veces *por sumando,* también repetimos n veces *por sumando* la tensión correspondiente;

esto mismo sucede cuando conocemos el precio del metro de un cierto conductor: para conocer el precio de n metros de conductor nos basta repetir por sumando n veces el precio del metro. En definitiva: transferimos la medida de las corrientes o de los precios de cable a la medida de las tensiones o de las longitudes de cable, cosa que no podemos hacer con esa misma ley de proporcionalidad para las sensaciones y los estímulos.

¿Cómo podremos lograr tal transferencia en forma de proporcionalidad entre las sensaciones y los estímulos? Hagamos corresponder a la sensación 20 no el estímulo 3, sino su logaritmo 0,48; entonces a un estímulo de $2 \times 0,48$ corresponde una sensación de 2×20, a un estímulo de $3 \times 0,48$ corresponde una sensación de 3×20 y, en general, a un estímulo de $n \cdot 0,48$ corresponde una sensación de $n \cdot 20$; en resumen: ahora sí que se verifica que repitiendo por sumando n veces el valor 0,48, la sensación sea n veces 20, y con ello habremos transferido, como en la ley corriente de proporcionalidad, la medida de las sensaciones a la medida de los estímulos, y ello únicamente al *hacer corresponder a una cierta sensación, no el estímulo, sino el logaritmo del estímulo que la produjo* (1).

Otro ejemplo típico de la necesidad de emplear estas unidades logarítmicas nos lo da la ganancia en tensión, por ejemplo, de un amplificador; en él nos interesa más que el valor absoluto de la tensión de salida, el cociente de ese valor por el valor que tiene la tensión a la entrada o relación de tensiones. Supongamos tres amplificadores colocados en serie de modo que la tensión de salida de cada uno se aplica a la entrada del siguiente y que para ellos haya perfecto acoplo de impedancias entre la salida de cada uno y la entrada del siguiente; entonces, si son e, u_1, u_2, u_3 las tensiones de entrada del primero y de salida de cada uno de los tres, las relaciones de tensión en cada uno son, respectivamente:

$$\frac{u_1}{e}, \ \frac{u_2}{u_1} \ \text{y} \ \frac{u_3}{u_2}$$

y la relación de tensiones entre la entrada y la tensión final, que es lo que verdaderamente interesa, vale $\frac{u_3}{e}$. Ahora bien, no es cierta la propiedad aditiva expresada en la forma

$$\frac{u_3}{e} = \frac{u_1}{e} + \frac{u_2}{u_1} + \frac{u_3}{u_2}$$

sino que la verdadera es

$$\frac{u_3}{e} = \frac{u_1}{e} \cdot \frac{u_2}{u_1} \cdot \frac{u_3}{u_2}$$

(1) Obsérvese que los estímulos son, en este ejemplo: log 3·2 log 3 = log 3·3, 3 log 3 = log 3·3·3 ... n log 3 = log 3·3 ... 3.

pero si en lugar de tomar las relaciones de tensiones tomamos los logaritmos de esas relaciones, tendremos

$$\log \frac{u_3}{e} = \log \frac{u_1}{e} + \log \frac{u_2}{u_1} + \log \frac{u_3}{u_2}$$

es decir, ahora sí es cierta la propiedad aditiva, y, por consiguiente, colocando n amplificadores de igual relación de tensiones en serie, no obtendremos n veces la relación de tensiones de uno de ellos, puesto que no es

$$\frac{u_n}{e} = n \frac{u}{e}, \text{ sino } \frac{u_n}{e} = \left(\frac{u}{e}\right)^n$$

pero sí obtendremos

$$\log \frac{u_n}{e} = n \log \cdot \frac{u}{e}$$

tomando los logaritmos de esas relaciones de tensiones o como se llaman las ganancias en tensión (1); podríamos dar otros ejemplos para líneas, atenuadores, etc., pero lo dicho es suficiente para justificar el uso de unidades logarítmicas en las medidas de transmisión.

Medida de potencias eléctricas en transmisión. El *decibelio* (dB) es la unidad logarítmica de medidas de potencias eléctricas, y se dice que dos potencias eléctricas difieren en n dB, cuando se tiene

$$n = 10 \cdot \log \frac{W_2}{W_1} \text{ (log representa logaritmo decimal)} \qquad (\alpha)$$

entonces se dice, también, que la potencia W_2 está a un nivel de n dB por encima o por debajo de la energía W_1, según que el número n sea positivo o negativo. Así, por ejemplo, si $W_2 = 100$ W y $W_1 = 10$ W, será $10 \log \frac{100}{10} = 10$ dB y los 100 W se encuentran a un nivel de 10 dB sobre los 10 W. Cuando n es positivo se dice también que al pasar de los 10 W a los 100 W ha habido una *ganancia* de 10 dB, mientras que si pasamos de los 100 W a los 10 W, se tiene $10 \cdot \log \frac{10}{100} = -10$ dB, y entonces se dice que hay una *pérdida* de 10 dB; los distintos valores que toma n en aquella expresión (α) decimos que representan otros tantos *niveles* de la potencia W_2 con respecto al nivel de la potencia W_1.

No existe aquí un nivel absoluto, y sólo medimos así diferencias de niveles, por lo que se ha convenido en elegir un nivel arbitrario como *nivel cero o de referencia.* Actualmente existen dos niveles cero de referencia convencionales; el uno, más corriente, es el de la potencia desarrollada en una resistencia de 500 Ω, cuando su valor es

(1) Después de multiplicar por 20.

precisamente de 0,006 W, con lo que la tensión en dicha resistencia para ese nivel de referencia valdrá $\sqrt{0,006 \times 500} = 1,73$ V; el otro nivel de referencia convencionalmente elegido cero y usado en Radiodifusión algunas veces, es de 0,0125 W en la misma resistencia de 500 Ω, lo que da entonces para la tensión a ese nivel cero el valor $\sqrt{0,0125 \times 500} = 2,5$ V. Refiriéndonos ahora al primer nivel cero convencional, el nivel de una potencia W referida a dicho nivel valdrá

$$10 \log \frac{W}{0,006} = -10 \log \frac{0,006}{W}$$

Si esa potencia es mayor de 0,006 W, dará niveles positivos o de *ganancias;* pero si es menor de 6 mW, dará niveles negativos o de *pérdidas.*

Se puede ahora determinar el nivel del segundo sistema de referencia, respecto al primero, que valdrá

$$10 \log \frac{0,0125}{0,006} = 10 \cdot \log 2,08 = 10 \times 0,32 = 3,2 \text{ dB},$$

y, por tanto, el nivel cero de los 12,5 mW está a 3,2 dB por encima del nivel de los 6 mW, lo que nos permite pasar fácilmente de un número de dB referido a un sistema, al que corresponde al otro (1).

EJERCICIO. Un nivel de 12,2 dB referido a los 6 mW, ¿qué valor representa referido a los 12,5 mW?

$$12,2 - 3,2 = 9 \text{ dB}.$$

EJERCICIO. El nivel de —6 dB respecto a 12,5 mW, ¿qué nivel representa, respecto a 6 mW?

$$-6 - (-3,2) = -6 + 3,2 = -2,8 \text{ dB}.$$

Para todos estos cálculos es de utilidad la pequeña tabla de logaritmos que damos al final de la obra, así como las tablas correspondientes dadas en este capítulo con la finalidad de evitar estos cálculos.

Medidas de tensiones o corrientes

La expresión de la potencia desarrollada en una impedancia de valor Z y de factor de potencia $\cos \varnothing = k$ en la que la tensión en sus extremos es E y la corriente que lo atraviesa vale I, admite las siguientes expresiones:

$$W = E \cdot I \cdot k = \frac{E^2}{Z \cdot k} = I^2 \cdot Z \cdot k.$$

Si tenemos, pues, dos potencias W_1 y W_2 y designamos con esos mismos subíndices las tensiones, corrientes, etc., de ambas, el número de deci-

(1) Modernamente se toma como nivel cero el de 1 milivatio en 500 Ω y los dB referidos a este nivel se designan por dbm. Es fácil ver que se pasa de unos otros mediante el sumando 7,78.

belios entre ambas potencias que antes hemos determinado, podrá escribirse así:

$$n = 20 \log \cdot \frac{E_2}{E_1} + 10 \log \frac{Z_1}{Z_2} + 10 \log \frac{k_1}{k_2}$$

$$n = 20 \log \frac{I_2}{I_1} + 10 \log \frac{Z_2}{Z_1} + 10 \log \frac{k_2}{k_1}$$

según se adopte para expresión de la potencia la segunda forma en función de las tensiones, o la tercera en función de las intensidades. Este caso es, no obstante, poco corriente, ya que lo usual es encontrar relaciones de potencia sobre *una misma impedancia* y ésta suele ser de tipo resistivo puro; en tales casos, estas dos expresiones se reducen a:

$$n = 20 \log \frac{E_2}{E_1}; \quad n = 20 \log \frac{I_2}{I_1}$$

Suponiendo que las impedancias en cuestión sobre las que actúan las tensiones o corrientes sean precisamente 500 Ω, se pueden expresar los niveles de aquellas magnitudes, referidos a las tensiones o corrientes del nivel cero de potencia, en la forma:

$$n = 20 \log \frac{E_2}{1{,}73}, \quad \text{o bien} \quad n = 20 \log \frac{E_2}{2{,}5}$$

y correlativamente para las corrientes:

$$n = 20 \log \frac{I_2}{0{,}0035}, \quad \text{o bien} \quad n = 20 \log \frac{I_2}{0{,}005}$$

en las cuales 3,5 y 5 mA son las corrientes al nivel de referencia de 6 y 12,5 mW, respectivamente.

Las dos expresiones en función de las tensiones o intensidades que hemos dado anteriormente pueden ponerse en la forma:

$$n_{dB} = 20 \log \frac{E_2}{E_1} + 20 \log \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = 20 \log \frac{E_2}{E_1} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

$$n_{dB} = 20 \log \frac{I_2}{I_1} + 20 \log \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}} = 20 \log \frac{I_2}{I_1} \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}$$

suponiendo que el factor de potencia es igual a uno. Estas fórmulas nos muestran que cuando queremos comparar el nivel de salida de tensión o corriente en un sistema de transmisión, con el de entrada,

y las impedancias son distintas, hay que introducir un *factor de corrección*, multiplicando la tensión de salida por $\sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$ o la corriente de salida por $\sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}$

Vamos a dar ahora algunas aplicaciones prácticas de las expresiones anteriores:

a) La gráfica de la figura 273 es muy útil cuando se conoce el

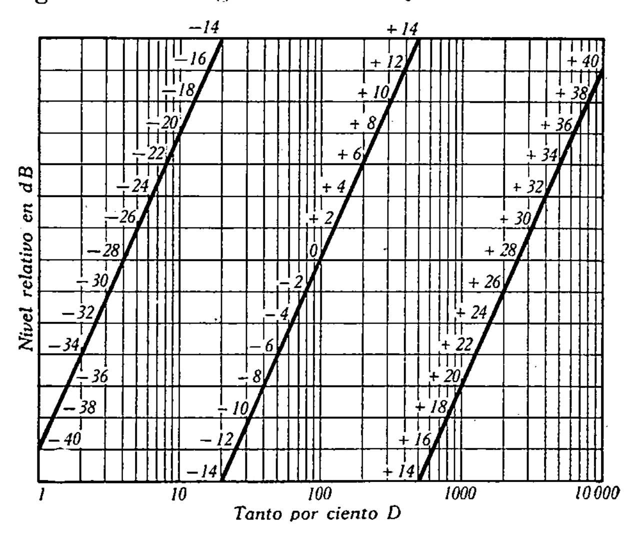


FIG. 273. Relación entre dB (tensión) y el tanto por ciento

porcentaje de una magnitud, tensión, corriente, amplitud, etc., y se quiere determinar su nivel relativo en decibelios; tal caso se presenta, por ejemplo, al determinar la deformación por armónicos en un amplificador (Capítulo XV) en que se conoce el porcentaje referido al fundamental y se desea conocer su nivel en decibelios por debajo del fundamental. Si es D el porcentaje de armónicos, entonces el nivel vale

$$n = 20 \log \frac{D}{100}$$

y basta buscar D en el eje horizontal, por ejemplo, el 4 %, para encontrar sobre su vertical —28 dB.

b) Pérdidas por derivación (Bridging loss). Supongamos dos impedancias en paralelo Z_1 y Z_2 y entre cuyas bornas existe la tensión E; para expresión de sus potencias P_1 y P_2 se tiene

$$10 \log P_2 = 10 \log P_1 + 10 \log \frac{Z_1}{Z_2}$$

lo que nos indica que la potencia P_2 puede expresarse mediante la P_1 sumándole el término de corrección $10 \cdot \log \frac{Z_1}{Z_2}$ que ya nos hemos encontrado antes y que se le llama *pérdidas por derivación* y representa la diferencia de niveles de energía en ambas impedancias; la gráfica de la figura 274 nos da sus valores en función de Z_1/Z_2. Una aplicación muy frecuente en la práctica de medidas se presenta en la *corrección de indicadores de volumen* (I. V.), que no son otra cosa que voltímetros calibrados en decibelios para una impedancia de 500 Ω. Si con un tal indicador de volumen tratamos de determinar los niveles de potencia sobre una impedancia Z de valor distinto de los 500 Ω, entonces el indicador de volumen nos señala el valor de $10 \cdot \log P_1$ en 500 Ω, mientras que el nivel verdadero viene dado por

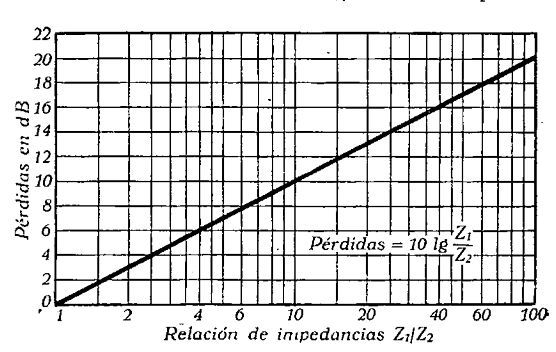


FIG. 274. Pérdidas por derivación entre dos impedancias

$$10 \log P_1 + 10 \log \frac{500}{Z}$$

es decir, debemos agregar a la indicación del indicador de volumen un término correctivo de esa forma $10 \cdot \log 500/Z$, el cual aparece ya calculado en la figura 275, que es muy útil a este fin. Es positivo si $Z < 500$, y negativo si $Z > 500$.

c) Otra aplicación interesante es la determinación de la impedancia de salida de amplificadores, osciladores, etc. (¹), Z_s y cuya impedancia de carga Z_L es conocida; sea V_o la tensión medida con el indicador de volumen en vacío o sin carga, y V_c la indicación del aparato con la carga Z_L; se tiene:

$$V_c = V_o \frac{Z_L}{Z_L + Z_s} \quad ,, \quad \frac{V_o}{V_c} = 1 + \frac{Z_s}{Z_L},$$

(¹) Cuando se trata de válvulas de salida de resistencia interior R_i acopladas a la carga Z_L mediante un transformador de relación n_s/n_p, es claro que la impedancia determinada no es R_i, ni la tensión V_o la determinada en los terminales del primario, sino las que se miden en el secundario, que valen, respectivamente:

$$Z_s = \left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2 R_i \quad \text{y} \quad V_o = \frac{n_s}{n_p} u_p \quad (u_p \text{ tensión del primario})$$

y de aquí:

$$20 \log \frac{V_o}{V_c} = 20 \log \left(1 + \frac{Z_s}{Z_L}\right)$$

El primer término nos lo da la diferencia de las dos lecturas de indicador de volumen y el valor de Z_s se determina del segundo miembro mediante un simple cálculo, o más sencillamente por la figura 276.

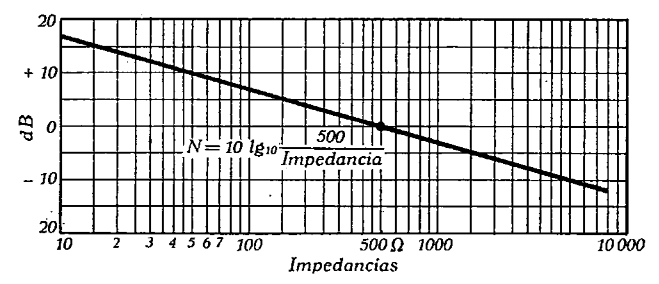


Fig. 275. Calibración del indicador de volumen cuando se usa con impedancia distinta de 500 ohmios

Por ejemplo: la diferencia de lecturas en el indicador de volumen es de 6 dB y la impedancia de carga vale 16 Ω; en la figura se ve que para 6 dB, $Z_L/Z_s = 0,95$ y por tanto $Z_s = 16/0,95 = 16,8\ \Omega$.

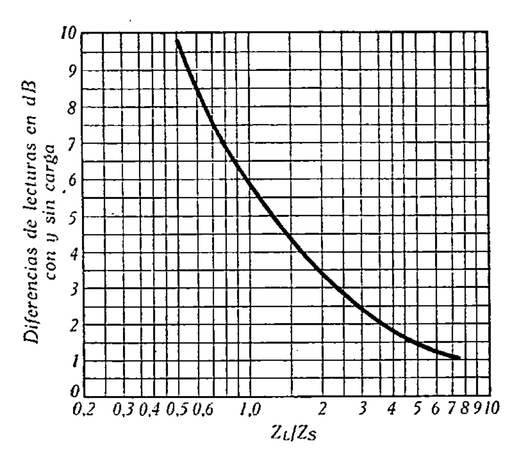


Fig. 276. Medida de la impedancia de salida, con medidor salida en derivación

A veces, el problema es inverso del anterior; se conoce la impedancia terminal del amplificador Z_a y se trata de determinar el valor de $\alpha = Z/Z_a$, relación de la carga, a la impedancia terminal, para comprobar si se encuentra comprendida entre determinados límites, precisos para obtener la máxima potencia sin deformación (véase Capítulo XV).

Para ello se conecta un indicador de volumen tal como se muestra en la figura 277, y se efectúan dos lecturas con una misma excitación, es decir, pasando una misma película patrón de frecuencias (Capítulo XIX) y manteniendo constantes las condiciones de trabajo del equipo; una con la carga propia del amplificador Z, y la otra con una carga resistiva artificial conocida R (pongamos 500 Ω), o bien en vacío,

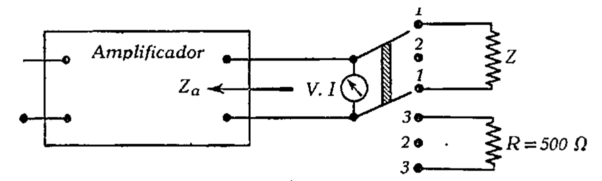


FIG. 277. Determinación de $a = Z/Za$ cuando se conoce Za impedancia terminal del amplificador

sin carga alguna. La diferencia de ambas lecturas permite la determinación de la relación α; en efecto, las tensiones respectivas en cada caso son:

$$E_Z = k\,\frac{Z}{Z + Z_a}\ ,,\quad E_R = k\,\frac{500}{500 + Z_a}\quad \text{y } E_o = k \quad (k \text{ constante}),$$

de donde:

$$\frac{E_z}{E_R} = \left(1 + \frac{Z_a}{500}\right)\frac{Z}{Z_a}\cdot\frac{1}{\left(1+\frac{Z}{Z_a}\right)} = \left(1 + \frac{Z_a}{500}\right)\frac{\alpha}{1+\alpha}$$

y

$$\frac{E_Z}{E_o} = \frac{\alpha}{1+\alpha}$$

Llamando N_Z, N_R y N_O las respectivas lecturas del indicador de volumen que corresponden a E_Z, E_R y E_O y tomando 20 log en las expresiones últimas:

$$N_Z - N_R = 20 \log\left(1 + \frac{Z_a}{500}\right) + 20 \log \frac{\alpha}{1+\alpha}$$

$$N_Z - N_O = 20 \log \frac{\alpha}{1+\alpha}$$

El término $20 \log\left(1 + \frac{Z_a}{500}\right)$ es una constante, para un amplificador dado, y vale precisamente N_o—N_R; así, si $Z_a = 500\ \Omega$:

$$N_R - N_o = -20 \cdot \log 2 = -6 \text{ dB},$$

y si $Z_a = 250\ \Omega$:

$$N_R - N_o = 20 \cdot \log 1{,}5 = -3{,}5 \text{ dB}.$$

Conociendo, pues, el valor de Z_a, se puede determinar, de la diferencia de lecturas $N_Z—N_R$ o de la diferencia $N_Z—N_o$, el valor de la relación α; pero es más práctico construir la curva de la figura 278, que nos puede servir para todos los casos sin necesidad de hacer ninguna operación

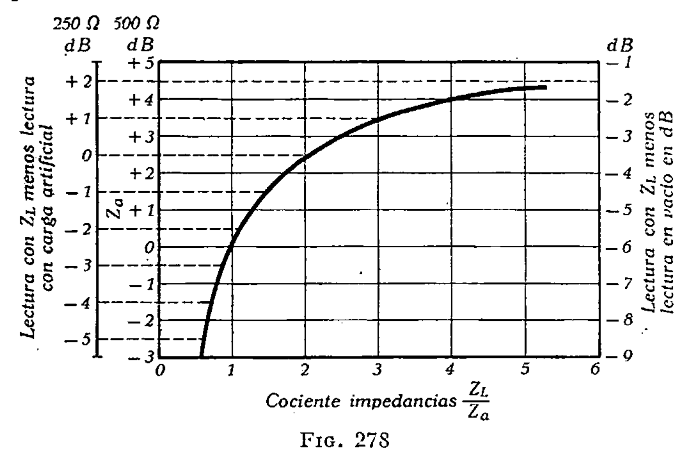


FIG. 278

aritmética, en la que se supone, en las respectivas escalas $Z_a = 500\ \Omega$ y $Z_a = 250\ \Omega$, estando desplazada la escala de la derecha de $500\ \Omega$ con respecto a la de la izquierda, que corresponde al vacío, aquellos —6 decibelios correspondientes al término $20 \log \left(1 + \frac{Z_a}{500}\right)$, mientras que para $Z_a = 250\ \Omega$ existe el desplazamiento de escalas de —2,5 dB, que corresponde a la diferencia de lecturas en ambos casos de $Z_a = 500$ y $Z_a = 250\ \Omega$.

EJERCICIO. Compruébese los valores de las lecturas para la relación $\alpha = 1{,}5$ y $\alpha = 2$, con los valores de la curva dados en ambos casos, y los dados por las expresiones correspondientes también en ambos casos.

d) Otra aplicación particularmente notable es la determinación del efecto de inserción de una resistencia en paralelo, sobre un circuito, como se indica en la figura 279. La tensión medida sobre R_2, sin intercalar R_s, es

$$E_2 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

después de intercalar R_s, vale

$$E_2' = E \frac{R_2 R_s}{R_1 R_2 + R_s (R_1 + R_2)}$$

y la relación entre ambas:

$$\frac{E_2}{E_2'} = 1 + \frac{R_1 R_2}{R_s (R_1 + R_2)} = 1 + \frac{R_c}{R_s}$$

donde R_c es la resistencia combinada de R_1 y R_2. Por tanto:

$$20 \log \frac{E_2}{E_2'} = 20 \log \left[1 + \frac{R_c}{R_s}\right]$$

el valor del primer término nos lo da, como antes, por diferencia de lecturas, el V. I.

Obsérvese que esta fórmula coincide con la que hemos dado en *c)*, si se supone R_2 igual a infinito. Una aplicación de este caso puede pre-

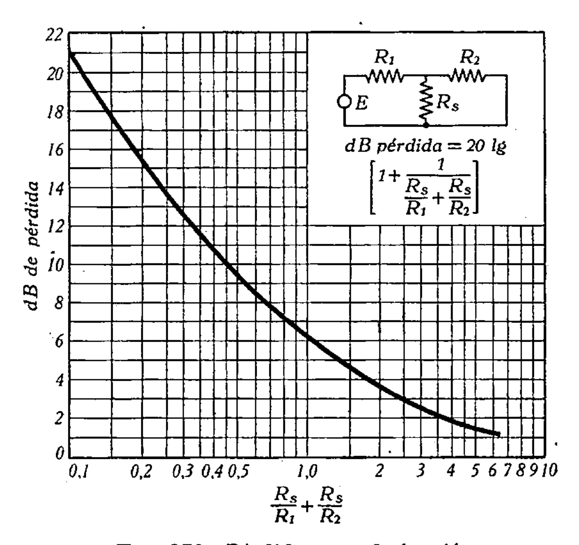


Fig. 279. Pérdidas por derivación

sentarse, por ejemplo, en la resistencia en paralelo colocada en el primario o secundario de un transformador.

Cuando las dos resistencias $R_1 = R_2 = R$, la fórmula se simplifica en la:

$$20 \log \frac{E_2}{E_2'} = 20 \log \left[1 + \frac{R}{2 R_s}\right]$$

y las figuras 279 y 280 son muy útiles para tales casos prácticos.

e) Finalmente, observemos que el término correctivo, varias veces encontrado, se puede escribir:

$$10 \log \frac{Z_1}{Z_2} = 20 \log \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = 20 \log \frac{z_1}{z_2}$$

con

$$z_1 = \sqrt{Z_1} \text{ y } z_2 = \sqrt{Z_2}$$

y en estos dos últimos aspectos se nos presenta en dos casos prácticos de relativo interés; ya hemos visto que en su primer aspecto aparece en el término correctivo de la relación de tensiones de dos impedancias distintas en que termina un sistema de transmisión, para determinar su ganancia en tensión o corriente; por ejemplo, en un amplificador de tensión, cuando sus impedancias de entrada y salida son distintas, etc. La última forma se presenta en el cálculo de un poten-

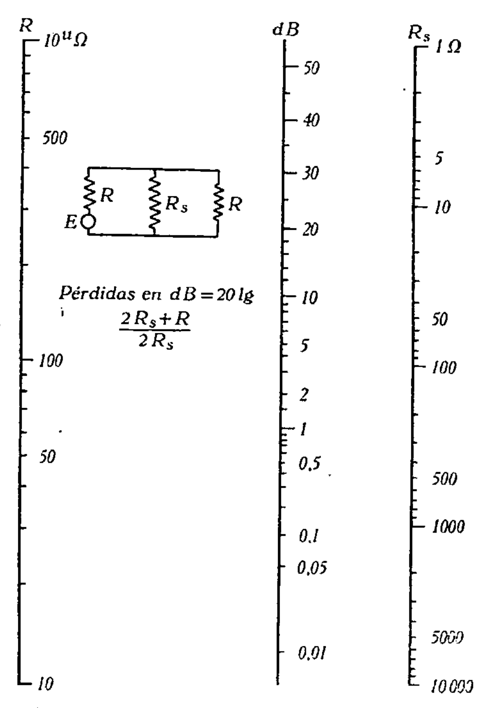


FIG. 280. Nomograma de pérdidas por derivación cuando $R_1 = R_2 = R$

ciómetro atenuador en el que se desea variar en un número determinado de decibelios, al pasar de una posición a la siguiente (véase Capítulo XIII), y la expresión en decibelios está dada por:

$$n_{dB} = 20 \log \frac{z_1}{z_2} \quad ,, \quad \frac{n_{dB}}{2} = 10 \log \frac{z_1}{z_2}$$

en que z_1 es la resistencia de la parte derivada y z_2 es la resistencia total del mismo. En ambos casos, la figura 274 nos podrá ser de utilidad, pues para el cálculo relativo al potenciómetro basta multiplicar por 2 el valor obtenido o tomado en decibelios, y para el primero, además de ello, tomar en el eje horizontal la raíz cuadrada de la relación de impedancias.

Nota. Para el caso de tomar como nivel de referencia los 12,5 mV, la figura 281 nos permite determinar el nivel de una tensión, o potencial en función del valor de dicha magnitud.

Otros sistemas de medida y paso de unos a otros

El sistema descrito hasta aquí es el fundado en los logaritmos decimales o de Briggs; pero existe otro sistema, en el cual, en lugar de

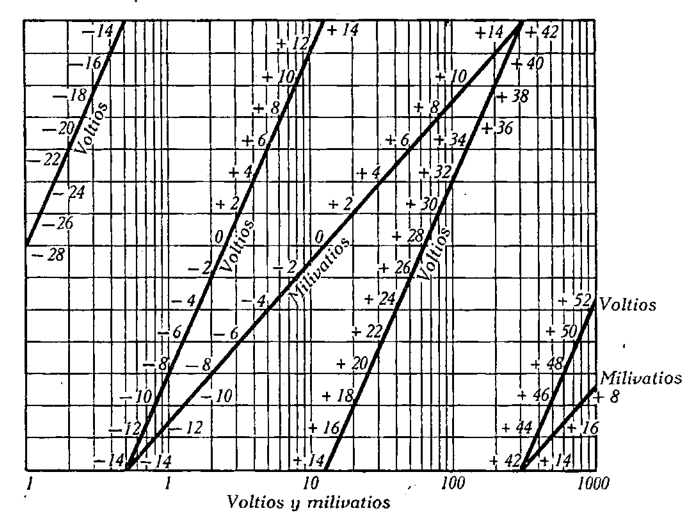


FIG. 281. Voltios y vatios en función de dB. (Nivel cero 12,5 milivatios a través de 500 Ω)

tomar como unidad el decibelio, se toma el Neper; en él, el sistema de logaritmos es el neperiano, de base $e = 2{,}718281$, y el desnivel en nepers de dos potencias W_1 y W_2 se da por

$$n_{\text{nepers}} = \frac{1}{2} \log_e \frac{W_2}{W_1}$$

y en el caso general de dos potencias sobre impedancias distintas a las que correspondan tensiones E_1 y E_2 y con distintos factores de potencia, se tiene, como antes:

$$N_{\text{nepers}} = \log_e \frac{E_2}{E_1} + \frac{1}{2} \log_e \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{1}{2} \log_e \frac{k_1}{k_2}$$

que se simplifica para una misma impedancia resistiva pura, en la forma:

$$N_{\text{nep}} = \log_e \frac{E_2}{E_1}$$

y correlativamente para las corrientes. Este sistema tiene su origen en las medidas en líneas telefónicas, aunque también se utiliza en ellas la medida en decibelios, que inicialmente se conoció con el nombre de (TU) o unidad de transmisión. Otra unidad hoy casi en desuso es la *milla de cable standard*, y las equivalencias entre todas ellas se dan en el cuadro siguiente:

Multiplíquese	por	para encontrar
decibelios	0,1151	nepers
decibelios	1,056	millas cable standard
millas de cable standard	0,947	decibelios
» » »	0,109	nepers
nepers	8,686	decibelios
»	9,175	millas cable standard

Unidad cruce aparente. En el estudio de interferencias y perturbaciones en elementos de circuitos, o en las líneas de transmisión en general, y sobre todo cuando el nivel de las señales que se propagan en esas líneas es pequeño, como sucede en los primeros eslabones de la cadena que supone un sistema de transmisión, tiene interés el estudio del cruce o inducción de una línea sobre otra, o de una parte o elemento de circuito sobre otro, y cuyo efecto perturbador puede expresarse en decibelios, nepers o *unidades de cruce aparente (crosstalk unit)*. Esta última unidad es, generalmente, más útil que el decibelio o cualquier otra unidad logarítmica, porque aquí se mantiene la proporcionalidad de los efectos de una línea sobre otra, y, por consiguiente, es más cómodo de manejar una unidad fundada en esa proporcionalidad que una logarítmica. Los valores del cruce producidos por desequilibrios de capacidad, resistencia, o acoplos magnéticos, etc., son, en general, proporcionales a las magnitudes del desequilibrio, cuando se emplea esta última unidad, lo que simplifica extraordinariamente los cálculos.

Para definir esta unidad, supongamos que sea I la corriente de entrada en el circuito perturbador y sea i la corriente de salida en el circuito perturbado y supongamos, además, que ambos circuitos tienen la misma impedancia; entonces, el número de unidades de cruce C entre ambos circuitos será:

$$C = \frac{i}{I} \cdot 10^6$$

Cuando ambos circuitos, perturbador y perturbado, tengan distintas impedancias Z_1 y Z_2 respectivamente, debe introducirse el factor de corrección $\sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}$ como siempre, que corresponde a las distin-

tas impedancias, y, por tanto, el número de unidades de cruce será:

$$C = \frac{i}{I}\sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}} \cdot 10^6$$

La equivalencia entre esta unidad y el número de decibelios, que llamaremos D, o el número de nepers, que llamaremos N, es como sigue ([1]):

$$D = -20\,(\log C - 6)$$
$$N = -2{,}3026\ (\log C - 6)$$
$$C = \text{antilog}\left(6 - \frac{D}{20}\right)$$
$$C = \text{antilog}\left(6 - \frac{N}{2{,}3026}\right)$$

La relación entre decibelios y unidades de cruce pueden determinarse a partir de una tabla de decibelios y relación o cociente de tensiones o corrientes, y tanto éste como muchos de los cálculos a que hemos hecho referencia a lo largo de los párrafos anteriores de este capítulo, se simplifican con el uso de las tablas que damos a continuación, cortesía de la General Radio.

Tablas de conversión de decibelios

Determinación de valores fuera del intervalo de conversión de las tablas. Los valores fuera de los límites de las tablas I o II que siguen, se pueden determinar con ayuda de las siguientes reglas:

TABLA I. **Conversión de decibelios en relaciones de voltajes o potencias**

Número positivo de decibelios (+): Réstese + 20 dB sucesivamente, del número de decibelios dado, hasta que el resto quede dentro del alcance de la Tabla I.

Para encontrar la relación de tensiones, multiplíquese por 10, el valor correspondiente en la columna *Relación de voltajes,* tantas veces como se haya restado 20 dB. *Para encontrar la relación de potencias,* multiplíquese por 100, el valor correspondiente en la columna *Relación de potencias,* tantas veces como se haya restado 20 dB.

EJEMPLO: Dados 49,2 dB:

$49{,}2 - 2 \times 20 = 9{,}2$ dB.

Relación de tensiones: 9,2 dB → $2{,}884 \times 10^2 = 288{,}4$.

Relación de potencias: 9,2 dB → $8{,}318 \times 100^2 = 83180$.

([1]) En todas estas relaciones, los log y antilog son decimales.

Número negativo de decibelios (—). Como antes, pero en lugar de restar, súmese +20 dB, y en lugar de multiplicar por 10, para la relación de tensiones, y por 100, para la relación de potencias, divídase por 10 y 100 respectivamente.

EJEMPLO: Dados —49,2 dB:

—49,2 + 2 × 20 = — 9,2 dB.

Relación de tensiones: — 9,2 → $0{,}3467 \times \frac{1}{10^2} = 0{,}003467$.

Relación de potencias: — 9,2 → $\frac{0{,}1202}{100^2} = 0{,}00001202$.

TABLA II. Conversión de relaciones de tensiones en decibelios

Para relaciones menores que el alcance de la tabla. Multiplíquese la relación dada, sucesivamente por 10, hasta que el producto se encuentre dentro de la tabla. Del número de decibelios así encontrado, réstese +20 dB por cada vez que se multiplicó por 10.

EJEMPLO: Relación de tensiones dada: 0,0131.

$0{,}0131 \times 10^2 = 1{,}31$.

De la tabla: 1,31 → 2,345 dB — 2 × 20 dB = — 37,655 dB.

Para relaciones mayores que el alcance de la tabla. Igual que antes, pero en lugar de multiplicar por 10 y restar 20, ahora se divide por 10 y se suma 20 respectivamente.

EJEMPLO. Relación dada de tensiones: 712.

$$\frac{712}{10^2} = 7{,}12$$

De la tabla: 7,12 → 17,050 dB + 2 × 20 dB = 57,050 dB.

TABLA I

DADOS: Decibelios **ENÇONTRAR: Relaciones de potencia y {de tensiones / de corrientes}**

SIGNO DE LOS DECIBELIOS

Para valores positivos (+) de decibelios
Ambas relaciones de tensiones y potencias son mayores que uno, y deben usarse las columnas de la derecha.

Para valores negativos(—) de decibelios
Ambas relaciones de tensiones y potencias son menores que uno, y deben usarse las columnas de la izquierda.

EJEMPLO:
Dados ± 9,1 dB.

Encontrar:

	Relación de potencias	Relación de tensiones
+9,1 dB	8,128	2,851
—9,1 dB	0,1230	0,3508

—dB+ ← → —dB+ ← →

Relación de voltajes	Relación de potencias	dB	Relación de voltajes	Relación de potencias	Relación de voltajes	Relación de potencias	dB	Relación de voltajes	Relación de potencias
1,0000	1,0000	0	1 000	1,000	1,5623	1,3162	5,0	1,778	3 162
0,9886	0,9772	0,1	1,012	1,023	5559	3090	5,1	1,799	3,236
9772	9550	2	1,023	1,047	5495	3020	5,2	1,820	3,311
9661	9333	3	1,035	1,072	5433	2951	5,3	1,841	3,388
9550	9120	4	1,047	1,096	5370	2884	5,4	1,862	3,467
9441	8913	5	1,059	1,122	5309	2818	5,5	1,884	3,548
9333	8710	6	1,072	1,148	5248	2754	5,6	1,905	3,631
9226	8511	7	1,084	1,175	5188	2692	5,7	1,928	3,715
9120	8318	8	1,096	1,202	5129	2630	5,8	1,950	3,802
9016	8128	9	1,109	1,230	5070	2570	5,9	1,972	3,890
8913	7943	1,0	1,122	1,259	5012	2512	6,0	1,995	3,981
8810	7762	1,1	1,135	1,288	4955	2455	6,1	2,018	4,074
8710	7586	1,2	1,148	1,318	4898	2399	6,2	2,042	4,169
8610	7413	1,3	1,161	1,349	4842	2344	6,3	2,065	4,266
8511	7244	1,4	1,175	1,380	4786	2291	6,4	2,089	4,365
8414	7079	1,5	1,189	1,413	4732	2239	6,5	2,113	4,467
8318	6918	1,6	1,202	1,445	4677	2188	6,6	2,138	4,571
8222	6761	1,7	1,216	1,479	4624	2138	6,7	2,163	4,677
8128	6607	1,8	1,230	1,514	4571	2089	6,8	2,188	4,786
8035	6457	1,9	1,245	1,549	4519	2042	6,9	2,213	4,898
7943	6310	2,0	1,259	1,585	4467	1995	7,0	2,239	5,012
7852	6166	2,1	1,274	1,622	4416	1950	7,1	2,265	5,129
7762	6026	2,2	1,288	1,660	4365	1905	7,2	2,291	5,248
7674	5888	2,3	1,303	1,698	4315	1862	7,3	2,317	5,370
7586	5754	2,4	1,318	1,738	4266	1820	7,4	2,344	5,495
7499	5623	2,5	1,334	1,778	4217	1778	7,5	2,371	5,623
7413	5495	2,6	1,349	1,820	4169	1738	7,6	2,399	5,754
7328	5370	2,7	1,365	1,862	4121	1698	7,7	2,427	5,888
7244	5248	2,8	1,380	1,905	4074	1660	7,8	2,455	6,026
7161	5129	2,9	1,396	1,950	4027	1622	7,9	2,483	6,166
7079	5012	3,0	1,413	1,995	3981	1585	8,0	2,512	6,310
6998	4898	3,1	1,429	2,042	3936	1549	8,1	2,541	6,457
6918	4786	3,2	1,445	2,089	3890	1514	8,2	2,570	6,607
6839	4677	3,3	1,462	2,138	3846	1479	8,3	2,600	6,761
6761	4571	3,4	1,479	2,188	3802	1445	8,4	2,630	6,918
6683	4467	3,5	1,496	2,239	3758	1413	8,5	2,661	7,079
6607	4365	3,6	1,514	2,291	3715	1380	8,6	2,692	7,244
6531	4266	3,7	1,531	2,344	3673	1349	8,7	2,723	7,413
6457	4169	3,8	1,549	2,399	3631	1318	8,8	2,754	7,586
6383	4074	3,9	1,567	2,455	3589	1288	8,9	2,786	7,762
6310	3981	4,0	1,585	2,512	3548	1259	9,0	2,818	7,943
6237	3890	4,1	1,603	2,570	3508	1230	9,1	2,851	8,128
6166	3802	4,2	1,622	2,630	3467	1202	9,2	2,884	8,318
6095	3715	4,3	1,641	2,692	3428	1175	9,3	2,917	8,511
6026	3631	4,4	1,660	2,754	3388	1148	9,4	2,951	8,710
5957	3548	4,5	1,679	2,818	3350	1122	9,5	2,985	8,913
5888	3467	4,6	1,698	2,884	3311	1096	9,6	3,020	9,120
5821	3388	4,7	1,718	2,951	3273	1072	9,7	3,055	9,333
5754	3311	4,8	1,738	3,020	3236	1047	9,8	3,090	9,550
5689	3236	4,9	1,758	3,090	3199	1023	9,9	3,126	9,772

TABLA I

(Continuación)



Relación de voltajes	Relación de potencias	dB	Relación de voltajes	Relación de potencias
1,3162	**1,1000**	**10,0**	**3,162**	**10,000**
3126	09772	10,1	3,199	10,23
3090	09550	10,2	3,236	10,47
3055	09333	10,3	3,273	10,72
3020	09120	10,4	3,311	10,96
2985	08913	10,5	3,350	11,22
2951	08710	10,6	3,388	11,48
2917	08511	10,7	3,428	11,75
2884	08318	10,8	3,467	12,02
2851	08128	10,9	3,508	12,30
2818	**07943**	**11,0**	**3,548**	**12,59**
2786	07762	11,1	3,589	12,88
2754	07586	11,2	3,631	13,18
2723	07413	11,3	3,673	13,49
2692	07244	11,4	3,715	13,80
2661	07079	11,5	3.758	14,13
2630	06918	11,6	3,802	14,45
2600	06761	11,7	3,846	14,79
2570	06607	11,8	3,890	15,14
2541	06457	11,9	3,936	15,49
2512	**06310**	**12,0**	**3,981**	**15,85**
2483	06166	12,1	4,027	16,22
2455	06026	12,2	4,074	16,60
2427	05888	12,3	4,121	16,98
2399	05754	12,4	4,169	17,38
2371	05623	12,5	4,217	17,78
2344	05495	12,6	4,266	18,20
2317	05370	12,7	4,315	18,62
2291	05248	12,8	4,365	19,05
2265	05129	12,9	4,416	19,50
2239	**05012**	**13,0**	**4,467**	**19,95**
2213	04898	13,1	4,519	20,42
2188	04786	13,2	4,571	20,89
2163	04677	13,3	4,624	21,38
2138	04571	13,4	4,677	21,88
2113	04467	13,5	4,732	22,39
2089	04365	13,6	4,786	22,91
2065	04266	13,7	4,842	23,44
2042	04169	13,8	4,898	23,99
2018	04074	13,9	4,955	24,55
1995	**03981**	**14,0**	**5,012**	**25,12**
1972	03890	14,1	5,070	25,70
1950	03802	14,2	5,129	26,30
1928	03715	14,3	5,188	26,92
1905	03631	14,4	5,248	27,54
1884	03548	14,5	5,309	28,18
1862	03467	14,6	5,370	28,84
1841	03388	14,7	5,433	29,51
1820	03311	14,8	5,495	30,20
1799	03236	14,9	5,559	30,90
1778	**03162**	**15,0**	**5,623**	**31,62**
1758	03090	15,1	5,689	32,36
1738	03020	15,2	5,754	33,11
1718	02951	15,3	5,821	33,88
1698	02884	15,4	5,888	34,67
1679	02818	15,5	5,957	35,48
1660	02754	15,6	6,026	36,31
1641	02692	15,7	6,095	37,15
1622	02630	15,8	6,166	38,02
1603	02570	15,9	6,237	38,90

Relación de voltajes	Relación de potencias	dB'	Relación de voltajes	Relación de potencias
1,1585	**1,02512**	**16,0**	**6,310**	**39,81**
1567	02455	16,1	6,383	40,74
1549	02399	16,2	6,457	41,69
1531	02344	16,3	6,531	42,66
1514	02291	16,4	6,607	43,65
1496	02239	16,5	6,683	44,67
1479	02188	16,6	6,761	45,71
1462	02138	16,7	6,839	46,77
1445	02089	16,8	6,918	47,86
1429	02042	16,9	6,998	48,98
1413	**01995**	**17,0**	**7,079**	**50;12**
1396	01950	17,1	7,161	51,29
1380	01905	17,2	7,244	52,48
1365	01862	17,3	7,328	53,70
1349	01820	17,4	7,413	54,95
1334	01778	17,5	7,499	56,23
1318	01738	17,6	7,586	57,54
1303	01698	17,7	7,674	58,88
1288	01660	17,8	7,762	60,26
1274	01622	17,0	7,852	61,66
1259	**01585**	**18,0**	**7,943**	**63,10**
1245	01549	18,1	8,035	64,57
1230	01514	18,2	8,128	66,07
1216	01479	18,3	8,222	67,61
1202	01445	18,4	8,318	69,18
1189	01413	18,5	8,414	70,79
1175	01380	18,6	8,511	72,44
1161	01349	18,7	8,610	74,13
1148	01318	18,8	8,710	75,86
1135	01288	18,9	8,811	77,62
1122	**01259**	**19,0**	**8,913**	**79,43**
1109	01230	19,1	9,016	81,28
1096	01202	19,2	9,120	83,18
1084	01175	19,3	9,226	85,11
1072	01148	19,4	9,333	87,10
1059	01122	19,5	9,441	89,13
1047	01096	19,6	9,550	91,20
1035	01072	19,7	9,661	93,33
1023	01047	19,8	9,772	95,50
1012	01023	19,9	9,886	97,72
1000	**01000**	**20,0**	**10,000**	**100,00**

—dB+

← →

Relación de voltajes	Relac. de pot.	dB	Relación de voltajes	Rel. de pot.
$3,162 \times 10^{-1}$	**10^{-1}**	**10**	**3,162**	**10**
10^{-1}	10^{-2}	20	10	10^{2}
$3,162 \times 10^{-2}$	10^{-3}	30	$3,162 \times 10$	10^{3}
10^{-2}	10^{-4}	40	10^{2}	10^{4}
$3,162 \times 10^{-3}$	10^{-5}	50	$3,162 \times 10^{2}$	10^{5}
10^{-3}	10^{-6}	60	10^{3}	10^{6}
$3,162 \times 10^{-4}$	10^{-7}	70	$3,162 \times 10^{3}$	10^{7}
10^{-4}	10^{-8}	80	10^{4}	10^{8}
$3,162 \times 10^{-5}$	10^{-9}	90	$3,162 \times 10^{4}$	10^{9}
10^{-5}	**10^{-10}**	**100**	**10^{5}**	**10^{10}**

TABLA II

DADA: Una relación de { tensiones / corrientes   ENÇONTRAR: El número de decibelios

RELACIONES DE POTENCIAS

Encontrar el número de decibelios que corresponde a una relación dada de potencias. Se busca para la relación dada, como si se tratase de una relación de tensiones, el número de decibelios que le corresponde en la tabla. El que corresponde a la relación de potencias es precisamente la mitad del número de decibelios encontrado.

EJEMPLO: Dada la relación de potencias: 3,41.

En la tabla: 3,41 → 10,655 dB $\times \frac{1}{2}$ = 5,328 dB.

Relación de voltajes	0,00	0,01	0,02	0,03	40,0	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1,0	**000**	**086**	**172**	**257**	**341**	**424**	**506**	**588**	**668**	**749**
1,1	828	906	984	1,062	1,138	1,214	1'289	1,364	1,438	1,511
1,2	1,584	1,656	1,727	1,798	1,868	1,938	2,007	2,076	2,144	2,212
1,3	2,279	2,345	2,411	2,477	2,542	2,607	2,671	2,734	2,798	2,860
1,4	2,923	2,984	3,046	3,107	3,167	3,227	3.287	3,346	3,405	3,464
1,5	3,522	3,580	3,637	3,694	3,750	3,807	3,862	3,918	3,973	4,028
1,6	4,082	4,137	4,190	4,244	4,297	4,350	4,402	4,454	4,506	4 558
1.7	4,609	4,660	4;711	4,761	4,811	4,861	4,910	4,959	5,008	5,057
1,8	5,105	5,154	5,201	5,249	5,296	5,343	5,390	5,437	5,483	5,529
1,9	5,575	5,621	5,666	5,711	5,756	5,801	5,845	5,889	5,933	5,977
2,0	**6,021**	**6,064**	**6,107**	**6,150**	**6,193**	**6,235**	**6,277**	**6,319**	**6,361**	**6,403**
2,1	6,444	6,486	6,527	6,568	6,608	6.649	6,689	6,729	6,769	6,809
2,2	6,848	6,888	6,927	6,966	7,008	7,044	7,082	7,121	7,159	7,197
2,3	7,235	7,272	7,310	7,347	7,384	7,421	7,458	7,495	7,532	7,568
2,4	7,604	7,640	7,676	7,712	7,748	7,783	7,819	7,854	7,889	7,924
2,5	7,959	7,993	8,028	8,062	8,097	8,131	8,165	8,199	8,232	8,266
2,6	8,299	8,333	8,366	8,399	8 432	8,465	8,498	8,530	8,563	8,595
2,7	8,627	8,659	8,691	8,723	8,755	8,787	8,818	8,850	8,881	8,912
2 8	8,943	8,974	9,005	9,036	9,066	9,097	9,127	9,158	9,188	9,218
2,9	9,248	9,278	9,308	9,337	9,367	9,396	9,426	9,455	9,484	9,513
3,0	**9,542**	**9,571**	**9,600**	**9,629**	**9,657**	**9,686**	**9,714**	**9,743**	**9,771**	**9,799**
3,1	9,827	9,855	9,883	9,911	9,939	9,966	9,994	10,021	10,049	10,076
3,2	10,103	10,130	10,157	10,184	10,211	10,238	10,264	10,291	10,317	10,344
3,3	10,370	10,397	10,423	10,449	10,475	10,501	10,527	10,553	10,578	10,604
3,4	10,630	10,655	10,681	10,706	10,731	10,756	10,782	10,807	10,832	10,857
3,5	10,881	10,906	10,931	10,955	10,980	11,005	11,029	11,053	11,078	11,102
3,6	11,126	11,150	11,174	11,198	11,222	11,246	11,270	11,293	11,317	11,341
3,7	11,364	11,387	11,411	11,434	11,457	11,481	11,504	11,527	11,550	11,573
3,8	11;596	11,618	11,641	11,664	11,687	11,709	11,732	11,754	11,777	11,799
3,9	11,821	11,844	11,866	11,888	11,910	11,932	11,954	11,976	11,998	12,019
4,0	**12,041**	**12,063**	**12.085**	**12,106**	**12,128**	**12,149**	**12,171**	**12,192**	**12,213**	**12,234**
4,1	12,256	12,277	12,298	12,319	12,340	12,361	12,382	12,403	12,424	12,444
4,2	12,465	12,486	12,506	12,527	12,547	12,568	12,588	12,609	12,629	12,649
4,3	12,669	12,690	12,710	12,730	12,750	12,770	12,790	12,810	12,829	12,849
4,4	12.869	12,889	12,908	12,928	12,948	12,967	12,987	13,006	13,026	13,045
4,5	13,064	13,084	13,103	13,122	13,141	13,160	13'179	13,198	13,217	13,236
4,6	13,255	13,274	13,293	13,312	13,330	13,349	13,368	13,386	13,405	13,423
4,7	13,442	13,460	13.479	13,497	13,516	13,534	13,552	13,570	13,589	13,607
4,8	13,625	13,643	13,661	13,679	13,697	13,715	13,733	13,751	13,768	13,786
4,9	13,804	13,822	13,839	13,857	13,875	13,892	13,910	13,927	13,945	13,962
5.0	**13,979**	**13,997**	**14,014**	**14,031**	**14,049**	**14,066**	**14,083**	**14,100**	**14,117**	**14,134**
5,1	14,151	14,168	14,185	14,202	14,219	14,236	14,253	14,270	14,287	14,303
5,2	14,320	14,337	14,353	14,370	14,387	14,403	14,420	14,436	14,453	14,469
5,3	14,486	14,502	14,518	14,535	14,551	14,567	14,583	14,599	14,616	14,632
5,4	14,648	14,664	14,680	14,696	14,712	14,728	14,744	14,760	14,776	14,791
5,5	14,807	14,823	14,839	14,855	14,870	14,886	14,902	14,917	14,933	14,948
5,6	14,964	14,979	14,995	15,010	15,026	15,041	15,056	15,072	15,087	15,102
5,7	15,117	15,133	15,148	15,163	15,178	15,193	15,208	15,224	15,239	15,254
5,8	15,269	15,284	15,298	15,313	15,328	15,343	15,358	15,373	15,388	15,402
5,9	15,417	15,432	15,446	15,461	15,476	15,490	15,505	15,519	15,354	15,549

TABLA II

(Continuación)

Relación de voltajes	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
6,0	**15,563**	**15,577**	**15,592**	**15.606**	**15,621**	**15,635**	**15,649**	**15,664**	**15,678**	**15,692**
6,1	15,707	15,721	15,735	15,749	15,763	15,778	15,792	15,806	15,820	15,834
6,2	15,848	15,862	15,876	15,890	15,904	15,918	15,931	15,945	15,959	15,973
6,3	15,987	16,001	16,014	16,028	16 042	16,055	16,069	16 083	16,096	16,110
6,4	16,124	16,137	16,151	16,164	16,178	16,191	16.205	16,218	16,232	16,245
6,5	16,258	16,272	16,285	16,298	16,312	16,325	16,338	16,351	16,365	16,378
6,6	16,391	16,404	16,417	16,430	16,443	16,456	16,469	16,483	16,496	16,509
6,7	16,521	16,534	16,547	16,560	16,573	16,586	16,599	16,612	16,625	16,637
6,8	16,650	16,663	16,676	16,688	16,701	16,714	16,726	16,739	16,752	16,764
6,9	16,777	16,790	16,802	16,815	16,827	16,840	16,852	16,865	16,877	16,890
7,0	**16,902**	**16,914**	**16,927**	**16,939**	**16,951**	**16,964**	**16,976**	**16,988**	**17,001**	**17,013**
7,1	17,025	17,037	17,050	17,062	17,074	17,086	17,098	17,110	17,122	17,135
7,2	17,147	17,159	17,171	17,183	17,195	17,207	17,219	17,231	17,243	17,255
7,3	17,266	17,278	17,290	17,302	17,314	17,326	17,338	17,349	17,361	17,373
7,4	17,385	17,396	17,408	17,420	17,431	17,443	17,455	17,466	17,478	17,490
7,5	17,501	17,523	17,524	17,536	17,547	17,559	17,570	17,582	17.593	17,605
7,6	17,616	17,628	17,639	17,650	17,662	17,673	17,685	17,696	17,707	17,719
7,7	17,730	17,741	17,752	17,764	17,775	17,786	17,797	17,808	17,820	17,831
7,8	17,842	17,853	17,864	17,875	17,886	17,897	17,908	17,919	17,931	17,942
7,9	17,953	17,964	17,975	17,985	17,996	18,007	18,018	18,029	18,040	18,051
8,0	**18,062**	**18,073**	**18.083**	**18,094**	**18,105**	**18,116**	**18,127**	**18,137**	**18,148**	**18,159**
8,1	18,170	18,180	18,191	18,202	18,212	18,223	18,234	18,244	18,255	18,266
8,2	18,276	18,287	18,297	18,308	18,319	18,329	18,340	18,350	18,361	18,371
8,3	18,382	18,392	18,402	18,413	18,423	18,434	18,444	18,455	18,465	18,475
8,4	18,486	18,496	18,506	18,517	18,527	18,537	18,547	18,558	18,568	18,578
8,5	18,588	18,599	18,609	18,619	18,629	18,639	18,649	18,660	18,670	18,680
8,6	18,690	18,700	18,710	18,720	18,730	18,740	18,750	18,760	18,770	18,780
8,7	18,790	18,800	18,810	18,820	18,830	18,840	18,850	18,860	18,870	18,880
8,8	18,890	18,900	18,909	18,919	18,929	18,939	18,949	18,958	18,968	18,978
8,9	18,988	18,998	19,007	19,017	19,027	19,036	19,046	19,056	19,066	19,075
9,0	**19,085**	**19,094**	**19,104**	**19,114**	**19,123**	**19,133**	**19.143**	**19,152**	**19,162**	**19,171**
9,1	19,181	19,190	19,200	19.209	19,219	19,228	19,238	19,247	19,257	19,266
9,2	19,276	19,285	19,295	19,304	19,313	19,323	19,332	19,342	19,351	19,360
9,3	19,370	19,379	19,388	19,398	19,407	19,416	19,426	19,435	19,444	19,453
9,4	19,463	19,472	19,481	19,490	19,499	19,509	19,518	19,527	19,536	19,545
9,5	19,554	19,564	19,573	19,582	19,591	19,600	19,609	19,618	19,627	19,636
9,6	19,645	19,654	19,664	19,673	19,682	19,691	19,700	19,709	19,718	19,726
9,7	19,735	19,744	19,753	19,762	19,771	19,780	19,789	19,798	19,807	19,816
9,8	19,825	19,833	19,842	19,851	19,860	19,869	19,878	19,886	19,895	19,904
9,9	19,913	19,921	19,930	19,939	19,948	19,956	19,965	19,974	19,983	19,991

Relación de voltajes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	**20,000**	**20,828**	**21,584**	**22,279**	**22,923**	**23,522**	**24,082**	**24,609**	**25,105**	**25,575**
20	26,021	26,444	26,848	27,235	27,604	27,959	28,299	28,627	28,943	29,248
30	29,542	29,827	30,103	30,370	30,630	30,881	31,126	31,364	31,596	31,821
40	32,041	32,256	32,465	32,669	32,869	33,064	33,255	33,442	33,625	33,804
50	33,979	34,151	34,320	34,486	34,648	34,807	34,964	35,117	35,269	35,417
60	35,563	35,707	35,848	35,987	36,124	36,258	36,391	36,521	36,650	36,777
70	36,902	37,025	37,147	37,266	37,385	37,501	37,616	37,730	37,842	37,953
80	38,062	38,170	38,276	38,382	38,486	38,588	38,690	38,790	38,890	38,988
90	39,085	39,181	39,276	39,370	39,463	39,554	39,645	39,735	39,825	39.913
100	**40,000**	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Los sistemas de transmisión

El uso creciente de los divisores de frecuencia en el circuito de salida del amplificador de potencia, así como el de los igualadores para corregir la respuesta parcial o total de alguno de los elementos que intervienen en el sistema de transmisión que constituye todo sistema reproductor de sonido, y aun el empleo de los atenuadores indispensables en los equipos de que nos ocupamos, impone la necesidad de dar unas breves ideas sobre las pérdidas de energía que por diversas causas pueden originarse a lo largo del sistema desde la fotocélula hasta los altavoces, como introducción al estudio de tales atenuadores, igualadores, etc., y sin cuyas ideas no sería tampoco posible el conocimiento exacto de los métodos de medida utilizados para corregir y comprobar el buen régimen de trabajo del equipo, así como las características de reproducción que puede garantizar el constructor del mismo.

Condición de máxima transferencia de energía de un generador a una carga Z_L. Según veremos al ocuparnos de la amplificación en potencia, la máxima potencia que se puede recoger, para una excitación dada de una válvula de potencia, de resistencia interior R_i, se obtiene precisamente cuando la impedancia de carga sea igual a R_i; esta conclusión no es más que un caso particular de una proposición más general: *la máxima potencia que puede absorber una impedancia, de un generador de tensión e impedancia interior dada Z_e conectado a dicha impedancia Z_L, se obtiene cuando ambas impedancias son conjugadas;* es decir, que si:

$$\begin{matrix} Z_e = R_e + j\,X_e \\ Z_L = R_L + j\,X_L \end{matrix} \quad \text{debe ser} \quad \begin{matrix} R_e = R_L \\ X_e = -\,X_L \end{matrix} \quad » \quad j = \sqrt{-1}$$

Por ejemplo: un generador cuya impedancia tenga una resistencia de 10 Ω y una capacitancia de 20 Ω, dará la máxima potencia a la carga cuando ésta tenga una componente resistiva de 10 Ω y una componente inductiva de 20 Ω, ya que ambas son entonces conjugadas. El medio de lograr este equilibrio de impedancias será colocar la carga de modo que su componente resistiva sea igual a la del generador, y después introducir una carga reactiva de ángulo de fase opuesto al de la del generador; se comprende que en general esto no será posible más que para determinada frecuencia y, por ello, casi siempre se impone a las impedancias la condición de ser resistivas puras, porque de ese modo el equilibrio se obtiene para todas las frecuencias y con ello la máxima transferencia de energía.

Refiriéndonos a este último caso, la figura 281 *a* muestra cómo varía la potencia útil W_L en la carga cuando varía la relación R_L/R_i entre la resistencia de carga y la del generador; esta curva es la representación de la expresión

$$\frac{W_L}{W_{\text{máx.}}} = \frac{4\,R_L\,R_i}{(R_L + R_L)^2} = \frac{4\,r}{(1+r)^2} \quad \text{si es } r = \frac{R_L}{R_i}$$

y en la que $W_L = \frac{e^2 R_L}{(R_L + R_i)^2}$ y para $R_i = R_L$ es $W_{\text{máx.}} = \frac{e^2}{4 R_i}$ (e = tensión del generador) (1).

Se observa que la curva en las proximidades de la cresta cae mucho más rápidamente a la izquierda que a la derecha, y, por tanto, cuando

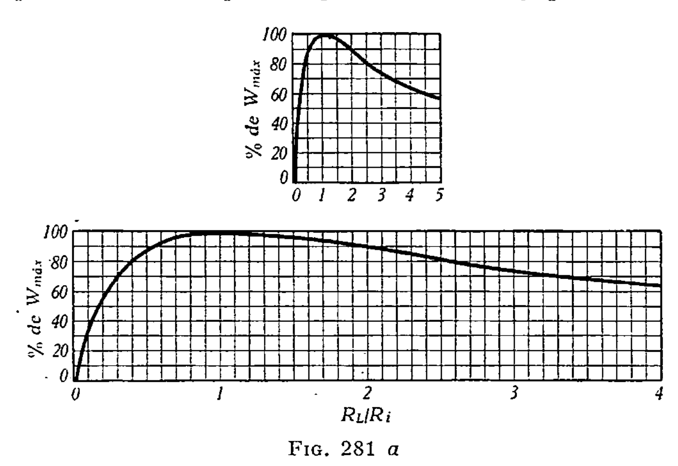


Fig. 281 *a*

no se puede realizar de una manera total el equilibrio de impedancias, será mayor la energía en la carga W_L tomando valores de $R_L > R_i$ que con valores de $R_L < R_i$; así, para $r = 0{,}25$, la potencia en la carga es ya sólo del 60 % de la máxima, mientras que, para $r = 1{,}25$, la misma potencia vale el 95 % de la máxima. Esto mismo explica también por qué los pentodos son tan críticos para su carga, es decir, por qué para variaciones muy pequeñas en su carga, las variaciones de energía en la misma son muy grandes; pues, por regla general, todos funcionan con una carga muy pequeña frente a su resistencia interior, y, por tanto, refiriéndonos a dicha figura, trabajan a la izquierda del máximo.

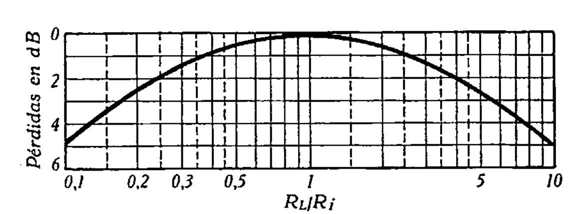


Fig. 281 *b*. Pérdidas por desequilibrio de resistencias

Pérdidas por reflexión. Si la misma relación la expresamos en decibelios, nos dará una medida de las pérdidas por tal desequilibrio que

(1) La parte inferior de la figura 281 *a* es idéntica a la parte superior, salvo que la escala de R_L/Ri se ha dilatado en la relación 5 a 1 para que se vea mejor la variación de energía.

se conoce también con el nombre de pérdidas por desequilibrio de impedancias o *pérdidas por reflexión:*

$$P_r = 10 \log \frac{W_L}{W_{máx.}} = 10 \log \frac{4 R_i R_L}{(R_i + R_L)^2} = 20 \log \frac{2\sqrt{R_L R_i}}{R_L + R_i}$$

y al término $\frac{2\sqrt{R_L R_i}}{R_L + R_i}$ se le llama *factor de reflexión;* tales pérdidas pueden ponerse en la forma:

$$P_2 = + 10 \log \frac{4 r}{(1 + r)^2} = - 10 \log \frac{(1 + r)^2}{4 r}$$

donde $r = \frac{R_L}{R_i}$ y la figura 281 *b* es una representación de tales pérdidas en función de los valores de *r*.

Cuando en lugar de dos resistencias se trata de dos impedancias Z_1 y Z_2, cuyos argumentos son Θ_1 y Θ_2, y tales que $\frac{|Z_2|}{|Z_1|} = r$, se produce también en su unión una pérdida por reflexión que se define como antes, mediante el *factor de reflexión*.

Para que se vea el interés de tal factor, vamos a considerar un generador de tensión *e* y de impedancia Z_g y una impedancia de recepción de valor Z_L; si conectamos ambas directamente y sus valores son distintos, es decir, no se cumple la condición de equilibrio de impedancias que antes hemos enunciado, la corriente en la carga Z_L viene dada por

$$I_L = \frac{e}{Z_g + Z_L}$$

En lugar de conectarlas directamente lo haremos intercalando un transformador ideal de relación óptima, es decir, definido por las siguientes condiciones:

a) Tiene inductancias infinitas en primario y secundario, pero la relación entre ambas es finita.

b) Tiene un acoplamiento perfecto entre primario y secundario, y carece de resistencias en sus devanados.

c) Su relación es la óptima para el acoplo de aquellas impedancias, es decir, tiene por valor:

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \left| \frac{Z_L}{Z_g} \right|$$

entonces se puede demostrar que la corriente que recorre la impedan-

cia Z_L es mayor que para cualquier otra relación n, y tiene por valor:

$$|I_{\text{máx.}}| = \frac{e}{2\sqrt{|Z_L\, Z_g|}\,\cos\dfrac{\varphi_g - \varphi_L}{2}}$$

en la que φ_L y φ_g son los ángulos de fase de las dos impedancias Z_g y Z_L.

Imaginemos, finalmente, que antes de introducir este transformador ideal, anulamos las de las componentes reactivas de las dos impedancias, de tal modo que éstas queden reducidas a sus componentes resistivas R_g y R_L, e inmediatamente insertamos aquel transformador; la corriente valdrá ahora

$$I' = \frac{e}{2\sqrt{R_g\, R_L}}$$

y la potencia disipada en Z_L será $W_{R_L} = \dfrac{e^2}{4\,R_g}$, que, según hemos visto ya, es la máxima que del generador se puede transferir a la carga.

Resultará, pues, que un transformador perfecto de relación óptima intercalado en las condiciones dichas anteriormente, o sea después de anular en ambas direcciones las componentes reactivas, es, entre todos los cuadripolos pasivos imaginables que se pueden intercalar, el que proporciona mayor energía sobre Z_L, y de aquí que se tome la corriente en tales condiciones, como tipo de comparación para evaluar las pérdidas que se producen por desequilibrio de impedancias, o cuando para equilibrarlas se inserta otro cuadripolo cualquiera.

Después de ello podremos comparar la corriente en la carga, cuando conectamos directamente ambas impedancias, con la que se obtiene en las condiciones óptimas, y a las pérdidas derivadas de tal modo se les llama *pérdidas de transición*, y su expresión es

$$20\log\frac{I'}{I_L} = 20\log\frac{|Z_g + Z_L|}{2\sqrt{R_g\,R_L}} = 10\log\frac{|Z_g + Z_L|^2}{4\,R_L\,R_g} =$$

$$= 10\log\frac{r^2 + 2\,r\,\cos\Phi + 1}{4\,r\cos\varphi_L\cos\varphi_g} = 10\log\frac{r^2 + 2\,r\,\cos\Phi + 1}{4\,r} +$$

$$+ 10\log\frac{1}{\cos\varphi_L\cos\varphi_g}$$

con $r = \left|\dfrac{Z_L}{Z_g}\right|$, $\Phi = \varphi_g - \varphi_L$, y φ_L y φ_g ángulos de fase de Z_L y Z_g,

las cuales pueden ser escritas así:

$$20\log\frac{I'}{I_L} = 10\log\frac{r^2 + 2\,r\,\cos\Phi + 1}{4\,r\,\cos^2\dfrac{\Phi}{2}} + 10\log\frac{\cos^2\dfrac{\Phi}{2}}{\cos\varphi_L\cos\varphi_g}$$

Determinemos ahora la pérdida que se produce cuando en lugar de conectar directamente las dos impedancias Z_g y Z_L, lo hacemos mediante un transformador de relación óptima para tales impedancias; tales pérdidas referidas al caso de conexión directa valen

$$20 \log \frac{I_L}{I_{\text{máx}}} = 20 \log \frac{2\sqrt{|Z_g Z_L|}}{|Z_L + Z_g|} \cos \frac{\Phi}{2} =$$

$$= 10 \log \frac{4\,|Z_L Z_g|}{|Z_L + Z_g|^2} \cos^2 \frac{\Phi}{2} = -10 \log \frac{r^2 + 2\,r \cos \Phi + 1}{4\,r \cos^2 \frac{\Phi}{2}}$$

o lo que es igual, constituyen una ganancia, puesto que, como vemos, su valor es cambiado de signo igual al primer término de los dos en que hemos descompuesto antes las pérdidas de transición.

Es por ello que al otro sumando de las pérdidas de transición dado por

$$10 \log \frac{\cos^2 \frac{\Phi}{2}}{\cos \varphi_L \cos \varphi_g}$$

se le llama *pérdidas por diferencia de fase*, ya que, efectivamente, sólo depende de los ángulos de fase de las dos impedancias. El primer sumando, en cambio, constituye las *pérdidas virtuales de transformador*, las cuales, como se ve, constan de dos términos; uno, el factor

$$\frac{\sqrt{4\,Z_L Z_g}}{Z_L + Z_g}$$

llamado *factor de reflexión* de las impedancias Z_g y Z_L, el que en el caso de ser resistivas ambas impedancias, se transforma en el término que nos dió en tal caso las pérdidas por reflexión (fig. 282 *a*); y otro el término relativo al coseno de la semidiferencia angular; es decir, la inserción del transformador neutraliza totalmente la pérdida por reflexión correspondiente al factor de reflexión, y compensa una parte de las pérdidas por diferencia de fase, quedando sin compensar otra parte, que es la residual cuando se inserta el transformador, que antes hemos llamado con ese nombre. Es evidente que la suma de ambas pérdidas de transformador y de diferencia de fase constituyen las pérdidas de transición.

FIG. 282. Dipolos equivalentes con 3 elementos

Redes o mallas eléctricas. En todos los sistemas de transmisión suelen conectarse entre sí y de las más variadas maneras posibles, resistencias, condensadores e inductancias, para, con finalidades variadas, formar grupos que se denominan *redes* o *mallas eléctricas* lineales. Generalmente, tales mallas se utilizan con la finalidad de modificar alguna característica de alguno de los eslabones del sistema de transmisión, o bien constituir uno de dichos eslabones; en el primer caso llevan dos terminales para su conexión y reciben el nombre de *dipolos*, mientras que en el segundo llevan cuatro terminales, dos que se llaman de entrada, por donde les llegan las corrientes a transmitir, y otros dos, llamados de salida, por donde esas corrientes se transmiten al eslabón siguiente; en tal caso, se llaman *cuadripolos*. Cada uno de los elementos componentes de un cuadripolo, es, pues, un dipolo, y cada dipolo puede estar constituído por un solo elemento, o por la agrupación de varios de cualquier modo, pero presentando siempre dos terminales para la conexión, y a los valores numéricos de los *elementos componentes* de cualquier red o malla, o sea, los valores numéricos de las resistencias, inductancias y condensadores, se les llama *constantes de la malla.*

Dipolos. Cada dipolo puede estar constituído, pues, por un solo elemento resistencia, inductancia o capacidad, o por la agrupación de varios de estos elementos, y puede ser *activo* o *pasivo*, según que entre los terminales y en cualquiera de sus componentes se encuentre o no un generador de fuerza electromotriz. De momento solamente nos ocuparemos de los pasivos, y para los efectos que producen sobre la red conectada en sus terminales, se puede aplicar el teorema de Thevenin y reemplazarlos por un generador, en serie con una *impedancia equivalente* a él; para estos dipolos pasivos es ésta la característica más importante, es decir, la impedancia que representan entre sus terminales tomando en cuenta los efectos de todos sus elementos componentes, o, de un modo más preciso, cómo varía esta impedancia con la frecuencia de la corriente aplicada entre sus terminales; pueden ser *reactivos* cuando entre todos sus elementos no figura ninguna resistencia. Cuando en un dipolo existen $N > 2$ elementos componentes, aparecen N constantes en la expresión de su impedancia, y si, como sucede a menudo, se trata de reemplazar estas constantes por otros parámetros, se suelen elegir casi siempre las frecuencias de resonancia y antirresonancia de sus elementos, las cuales juegan un papel importante en la variación de la impedancia del dipolo con la frecuencia; un ejemplo típico lo encontramos en el estudio del circuito equivalente del amplificador de tensión, acoplado por transformador, que estudiaremos más adelante. En tales casos (1), el número de parámetros es inferior a N en una unidad, y para reemplazar totalmente las constantes de la red necesitamos elegir otro parámetro u otra frecuencia arbitraria; esta frecuencia crítica se determina de un modo especial en cada caso particular y se designará en lo sucesivo por f_s; así hare-

(1) Es decir, eligiendo como parámetros esas frecuencias.

mos en el caso de la frecuencia de corte, al hacer el estudio de los amplificadores, cuando el dipolo esté constituído por una resistencia y una reactancia; en tal caso, sólo hay dos elementos y basta reemplazar una de las dos constantes del dipolo por la frecuencia de corte; así, para una resistencia R en serie con una inductancia L, se tiene f_s igualando la inductancia a la resistencia:

$$Z = R + jL\omega \text{ » } L\omega_s = R, \; f_s = \frac{\omega_s}{2\pi}, \; Z = R\left(1 + j\,\frac{\omega}{\omega_s}\right) = R\left[1 + j\,\frac{f}{f_s}\right]$$

Cuando se trata de un dipolo con una bobina y un condensador, la frecuencia f_s se determina por la condición de que la reactancia de dipolo tome un determinado valor numérico X_s. La elección adecuada de esta frecuencia tiene mucho interés en el estudio de igualadores, porque simplifica notablemente las expresiones que dan allí las pérdidas de inserción, de que habremos de ocuparnos.

Muchas veces es posible encontrar pares de dipolos que tengan la misma impedancia para cualquier frecuencia, aun cuando tengan distintas constantes y los elementos dispuestos de diferente forma: tales dipolos se llaman *equivalentes* y deben tener el mismo número de elementos, con una relación definida entre sus constantes. En general, no todo dipolo tiene uno equivalente, pero sí es posible encontrar equivalentes que tengan dos o más elementos de la misma clase, entendiendo por tales: resistencias, inductancias o condensadores. La determinación de dipolos equivalentes tiene interés porque pueden reemplazarse mutuamente, y el dipolo equivalente de uno dado puede ser más barato y fácil de construir que el propuesto. Cuando el dipolo tiene sólo uno o dos elementos, su equivalente es idéntico y no interesa. Para dipolos con tres elementos, existen dipolos equivalentes de interés, sólo si dos de los elementos del dipolo propuesto son de la misma clase. Finalmente, si los tres elementos son de distinta clase, no existe dipolo equivalente. Para determinar si una red es equivalente a otra, bastará identificar las partes resistivas y las reactivas de sus respectivas impedancias entre los dos terminales, y el resultado nos dará las relaciones que deben cumplirse entre sus elementos, si son equivalentes:

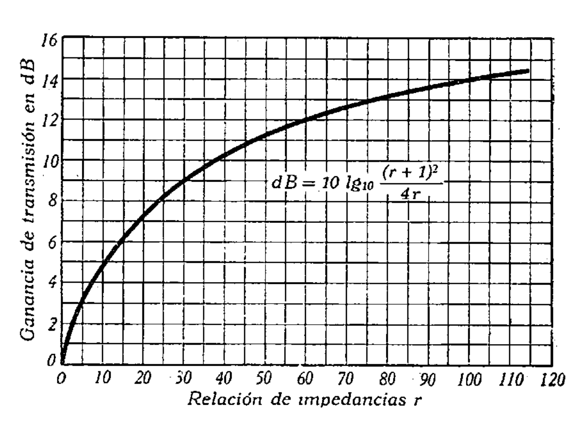


FIG. 282 *a*

EJERCICIO. Compruébese que para la equivalencia de los dipolos de la figura 282 se precisan las condiciones indicadas en la misma.

Dipolos inversos. Son dos dipolos tales que sus impedancias Z_1 y Z_2 tienen la potencia de inversión R_o, es decir, cumplen con la condición

$$Z_1 \times Z_2 = R_o^2.$$

Como quiera que Z_1 y Z_2 son, en general, números complejos, R_o, en general, también lo será, pero el caso práctico importante, que se presenta en el estudio de filtros e igualadores, es que R_o sea real, es decir, resistiva y precisamente igual a la impedancia conectada a los terminales del dipolo; en general, R_o es una cantidad conocida. Para que la red inversa de una dada esté completamente determinada, se requiere

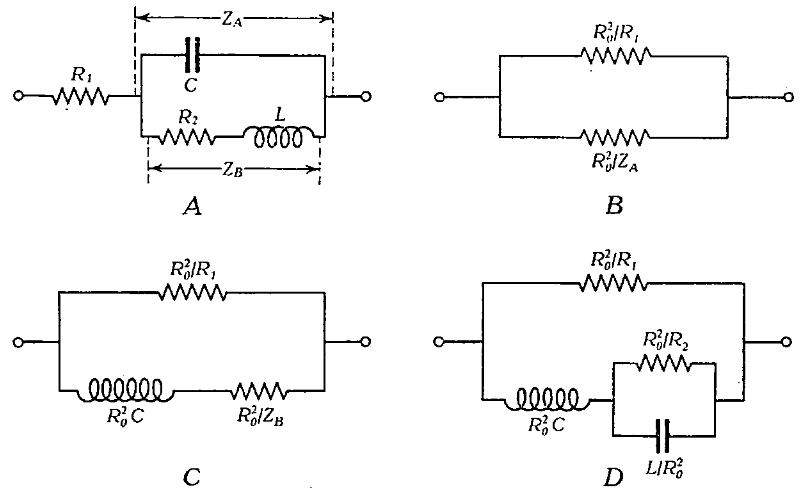


FIG. 283. Transformación de (A) en (D) por inversión sobre R_o

conocer, no solamente su impedancia, sino también la forma en que deben conectarse sus elementos y cuáles son éstos.

La determinación de dipolos inversos puede hacerse fácilmente en ciertos casos, valiéndose de las siguientes reglas:

a) Cuando uno de los elementos de inversión Z_1 tiene una resistencia, la otra impedancia Z_2 tiene también una resistencia.

b) Si Z_1 es una capacidad, Z_2 es una inductancia, y recíprocamente.

c) Si Z_1 consta de dos impedancias en serie, Z_2 consta de las inversas de estas dos impedancias en paralelo.

Con estas tres reglas, y a partir de las dos primeras aplicadas a una sola resistencia, inductancia o capacidad, se puede fácilmente obtener la inversa de una red dada.

EJERCICIO. Compruébese los pasos sucesivos mostrados en la figura 283, para determinar la inversa del dipolo *A* en *D*.

Cuadripolos. Igual que los dipolos, pueden ser activos y pasivos según tengan o no algún generador de tensión en alguno de sus dipolos

componentes; un ejemplo de cuadripolo activo típico lo constituye un amplificador. Aquí serán objeto de estudio solamente los pasivos. Para estos cuadripolos no tiene sentido la definición de impedancia que se conoce para un dipolo, pero se puede definir una magnitud de las mismas dimensiones físicas y que juega un papel equivalente.

En los sistemas de transmisión que utilizan cuadripolos se disponen éstos generalmente de modo que las impedancias conectadas a los terminales de entrada y de salida del cuadripolo sean resistencias puras, y las llamaremos en lo sucesivo R_g y R_L; suelen ser distintas, pero cuando sean iguales las designaremos, por analogía con el caso de dipolos, por R_o. En ciertos tipos de cuadripolos, como son los filtros, se precisa que R_g y R_L sean resistencias iguales, a menos que estén diseñados expresamente para efectuar una transformación de impedancias; en otros casos, como cuando se trata de atenuadores, no se precisa que tales resistencias sean iguales, aun cuando usualmente lo sean. Finalmente, todos los cuadripolos pueden tener sus 3 dipolos componentes conectados en estrella o en triángulo, y existe un teorema que demuestra que se puede encontrar para uno dado en estrella otro equivalente conectado en triángulo, es decir, se pueden determinar sus dipolos componentes en función de los del propuesto, bajo la condición de que la corriente valga igual en cada nudo o vértice, y la impedancia sea la misma entre cada dos vértices.

Tipos de cuadripolos. Generalmente, los cuadripolos se insertan en el sistema de transmisión con la finalidad de que realicen una determinada función, y atendiendo a ésta se clasifican de la siguiente manera:

a) Atenuadores: son cuadripolos cuyas pérdidas de inserción, de que hablaremos después, no varían con la frecuencia; sin embargo, esto sólo se cumple bajo ciertas condiciones que impone su diseño, y cuando éstas son sobrepasadas puede haber desviaciones de esas pérdidas con las variaciones de la frecuencia de la corriente.

b) Igualadores: en ellos, las pérdidas de inserción varían con la frecuencia de un modo establecido de antemano, con la finalidad, por regla general, de compensar la respuesta en frecuencias del sistema de transmisión en el cual se han insertado.

c) Filtros eléctricos: la finalidad que se busca en ellos es una atenuación total en ciertas bandas de frecuencias, y una transmisión sin casi atenuación en una o varias bandas de frecuencias, llamadas por esto *bandas de paso;* por lo general, muy pocos filtros tienen más de una banda de paso. Entre sus elementos no figuran resistencias.

d) Correctores de fase o mallas retardatrices, que tienen la propiedad de cambiar de una manera predeterminada las relativas fases de las distintas frecuencias de una banda de paso correspondiente a un sistema de transmisión o de un filtro; aunque prácticamente es inevitable una pequeña disipación de energía en sus elementos componentes, estas mallas no atenúan las distintas frecuencias de su banda de trans-

misión. Se utilizan para corregir la deformación de fase de que después hablaremos, de igual modo que los igualadores corrigen la deformación en frecuencia por atenuación. Estas mallas son raramente empleadas en los equipos de reproducción, ya que el origen de la deformación por defasaje suele ser la gran longitud de las líneas.

Estructuras lineales de cuadripolos. Generalmente, los cuadripolos no actúan individualmente, sino que se disponen en tándem o serie, formando configuraciones semejantes, reiteradas en escala lineal

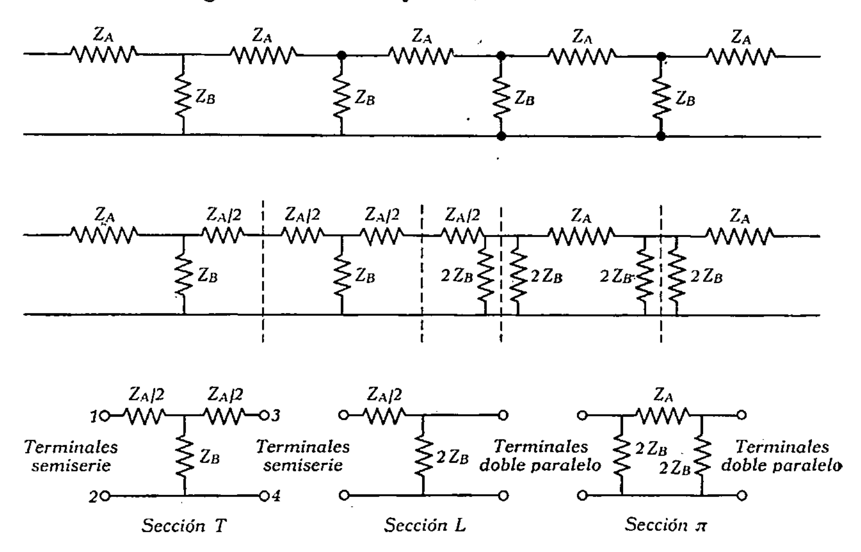


Fig. 284. Estructura lineal en escala

(ladder-type), análogas a una escalera de carpintero; tal es el caso de la figura 284, en que cada cuadripolo está constituído por una impedancia serie Z_a y una impedancia en paralelo Z_b; se les llama también *mallas en L.* De este tipo de escala se puede llegar a la concepción de la malla o *célula en T,* tal como se indica en la misma figura, o a una *célula en π,* siendo evidente la designación que se hace para sus elementos componentes; las terminales se llaman en *semiserie* cuando su impedancia serie es la mitad de la de la escala inicial, y en semiparalelo o *doble-paralelo* cuando la impedancia en paralelo tiene doble valor del de la escala inicial. Las secciones en *L* se llaman también semicélulas, porque dos células en *L* conectadas juntas pueden formar una célula en *T* o una en *π*, según la manera de conectarlas. Finalmente, todas las células de la figura son células desequilibradas en el sentido de que no tienen la misma impedancia en ambas líneas y no están equilibradas con respecto a tierra; cuando se precisa tal requisito se llega a las células en *H*, fácilmente deducibles de las anteriores; conectando el centro a tierra, las perturbaciones inducidas en ambos lados

de la línea se encuentran al mismo potencial con respecto a tierra y se anulan, tal como indicaremos al hablar de los *Blindajes*.

Características fundamentales de un cuadripolo. Si se considera intrínsecamente el cuadripolo en relación con las frecuencias de transmisión, interesa conocer la característica de impedancia, la característica de atenuación y la característica de defasaje; si tomamos en cuenta, además, las impedancias entre las cuales debe trabajar, se requiere conocer las pérdidas de inserción (dentro de las cuales se encuentran incluídas las de atenuación) y las impedancias imágenes y conjugadas; finalmente, si se atiende a las impedancias terminales de una estructura lineal, se requiere el conocimiento de una magnitud llamada impedancia iterativa; cada una de estas características vamos a definirlas a continuación.

Impedancias características o imágenes. Como no tiene sentido esta característica tal cual la definimos para un dipolo, por existir cuatro terminales y porque la impedancia medida en los de entrada o salida depende de la impedancia con que carguemos los terminales opuestos, se definen las impedancias *terminales*, de entrada y salida, en vacío y en corto circuito que, como su mismo nombre indica, son las medidas en los terminales de entrada Z_{v1} y Z_{c1} cuando los terminales de salida están sin conectar o unidos entre sí sin ninguna impedancia; análogamente, se definen las de salida Z_{v2} y Z_{c2}. Estas cuatro impedancias dan lugar a otras dos, de verdadera importancia, derivadas de ellas por las condiciones:

$$Z_1 = \sqrt{Z_{c1} Z_{c2}} \quad \text{y} \quad Z_2 = \sqrt{Z_{v1} Z_{v2}}$$

que se llaman *impedancias características* de entrada y salida respectivamente. Estas impedancias desempeñan en los cuadripolos un papel semejante a la de los dipolos, y para ellas se demuestra que si cargamos los terminales de salida con una impedancia de carga $R_L = Z_2$, la impedancia terminal de entrada es precisamente Z_1, mientras que si cargamos los terminales de entrada con una carga $R_g = Z_1$, la impedancia terminal de salida es precisamente Z_2. El interés de este teorema estriba en que si se eligen las impedancias características Z_1 y Z_2, respectivamente iguales a las impedancias resistivas del generador y de la carga, hay equilibrio de impedancias en las dos conexiones del cuadripolo y, por tanto, no habrá pérdidas por reflexión, ni a la entrada, ni a la salida del cuadripolo; se les llama también *impedancias imágenes* y se designan a menudo con Z_{i1} y Z_{i2}.

Cuando Z_{i1} y Z_{i2} son resistivas puras, se cumplen las condiciones de máxima transferencia de energía para todas las frecuencias, pero cuando son propiamente impedancias Z_1 y Z_2, ya no se cumplen las condiciones de mejor adaptación de impedancias, y entonces, si se quiere que esto se realice, se requiere definir dos nuevas impedancias, que se conocen con el nombre de:

Impedancias conjugadas. Supongamos que cargamos el cuadripolo con dos impedancias Z_{c1} y Z_{c2} tales que la impedancia del cuadripolo medida en los terminales de entrada, cuando los de salida están cargados con Z_{c2}, sea precisamente la conjugada de Z_{c1}, y cargado a la entrada con Z_{c1}, la medida a la salida sea precisamente la conjugada de Z_{c2}; este caso es el de mejor adaptación de impedancias, ya que tanto en los terminales de entrada como de salida, las impedancias conectadas a ellos son conjugadas entre sí; tales impedancias se llaman conjugadas. Si las impedancias medidas con tales cargas son, respectivamente:

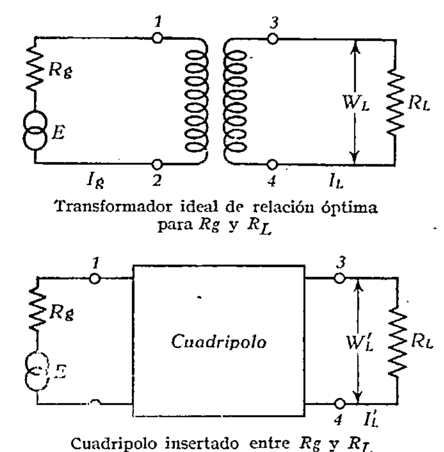
$$Z_1 = \bar{Z}_{c1} = r_1 + x_1 j \quad Z_2 = \bar{Z}_{c2} = r_2 + j x_2,$$

las impedancias conjugadas serán:

$$Z_{c1} = r_1 - x_1 j \quad \text{y} \quad Z_{c2} = r_2 - j x_2$$

Impedancias iterativas. Supongamos conectadas a los terminales de entrada y de salida del cuadripolo dos impedancias Z_{k1} y Z_{k2} tales que la impedancia que presenta el cuadripolo entre sus terminales de entrada, cuando los terminales de salida se cargan con Z_{k2} sea precisamente Z_{k2}, y cuando se carguen los de entrada con Z_{k1}, la impedancia que presenta el cuadripolo en los terminales de salida, sea precisamente Z_{k1}; tales impedancias se llaman impedancias iterativas del cuadripolo y, como las demás, son únicas. Tienen mucha importancia en el estudio de atenuadores, y para ellas se demuestra que su media geométrica es igual a la media geométrica de las impedancias imágenes, es decir:

$$\sqrt{Z_{k1} Z_{k2}} = \sqrt{Z_{i1} Z_{i2}}$$



Transformador ideal de relación óptima para Rg y R_L

Cuadripolo insertado entre Rg y R_L

FIG. 284 bis. Pérdidas de inserción

Todas estas definiciones son constructivas, lo que quiere decir que dados los elementos de un cuadripolo cualquiera y la disposición de los mismos, basta aplicar la definición para determinar tales impedancias.

Pérdidas de inserción y pérdidas de atenuación. Las pérdidas de inserción de un cuadripolo dan una medida de las pérdidas que experimenta el sistema de transmisión por la inserción del cuadripolo en dicho sistema. Como las partes del sistema anteriores y posteriores al cuadripolo tienen, en general, diversas impedancias,

supondremos, como es el caso usual, que ambas son resistivas e iguales. *Bajo esta condición*, las pérdidas de inserción del cuadripolo se determinan por la relación de potencias suministradas a la carga antes y después de insertar el cuadripolo. Si llamamos W_L a la potencia recogida en la carga antes de la inserción y W'_L a la misma después de la inserción, tales pérdidas vendrán dadas por [1]

$$P.\,I. = 10 \cdot \log \frac{W_L}{W'_L}$$

En el caso de que la resistencia de carga R_L no sea igual a la resistencia de emisión R_g, la potencia W_L se define como la recogida en la carga R_L, a través de un transformador ideal con la relación de transformación $n^2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \frac{R_g}{R_L}$ que, según hemos visto en el estudio del transformador, es la óptima para equilibrar las dos impedancias R_L y R_g; en tal caso, según se ve allí, W_L es, además, la máxima que el generador de impedancia R_g puede suministrar a la carga R_L. Naturalmente, si ambas resistencias son iguales, están equilibradas y no se precisa tal transformador. El interés de esta potencia de referencia y, por consiguiente, de esta definición de *P. I.* estriba en que representan verdaderas pérdidas para todo cuadripolo pasivo, pues siendo W_L la máxima que del generador puede recibir la carga, no importa qué malla se inserte entre ambas resistencias, no será nunca posible obtener una ganancia de inserción; esto nos confirma, además, la importancia del papel que juega el transformador perfecto en los problemas de transmisión, y el porqué de su intervención, en los casos de desequilibrio de impedancias; en fin de cuentas, lo que hacemos es comparar el sistema de transmisión, después de insertar el cuadripolo en estudio, con el sistema de referencia representado en la figura 284 bis, en el cual el transformador es uno ideal, tal como fué definido, y con una relación de transformación que equilibre ambas resistencias R_L y R_g.

Para tal sistema de referencia, se tiene, llamando W_g la potencia enviada al transformador e I_g a la corriente:

$$I_g = \frac{E}{2\,R_g} \qquad W_g = \frac{E^2}{4\,R_g}$$

y por no tener pérdidas tal transformador ideal:

$$W_L = W_g = \frac{E^2}{4\,R_g} = I^2_L\,R_L \quad » \quad I_L = \sqrt{\frac{W_L}{R_L}} = \frac{E}{2\sqrt{R_L\,R_g}}$$

---

(1) En realidad debería tomarse $\frac{W'_L}{W_L}$, con lo que las P. I. serían siempre negativas, pero para no poner siempre el signo = de manifiesto, tomamos su inversa.

tales son, pues, la potencia y corriente de referencia, para computar las pérdidas de inserción.

Si, como se ve en la figura 284 bis, son ahora W_L' e I_L' la potencia y corriente, después de la inserción del cuadripolo, las pérdidas de inserción se podrán también dar en la forma

$$PI = 20 \cdot \log \frac{I_L}{I'_L}$$

Supongamos ahora un cuadripolo trabajando entre dos impedancias resistivas iguales a sus impedancias imágenes, o en el caso más general, entre sus dos impedancias conjugadas; entonces las pérdidas de in-

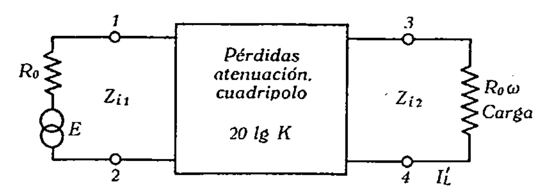


Fig. 285. Pérdidas de inserción

serción, que no implican desequilibrio de impedancias en sus terminales, se denominan pérdidas *de atenuación* y llamando como antes K a la relación I_L/I_L' de las corrientes en la carga, las pérdidas de atenuación las designaremos en lo sucesivo por

$$PA = 20 \cdot \log K.$$

Si, como es corriente, el cuadripolo trabaja entre dos impedancias resistivas (fig. 285), que no equilibran a las impedancias imágenes del mismo, entonces las pérdidas de inserción se componen de las pérdidas de atenuación más los términos correctivos que tienen en cuenta el desequilibrio de impedancias en los terminales del cuadripolo; la magnitud de estos términos correctivos es tanto mayor cuanto más alejados estemos de las condiciones de equilibrio. Tales términos se agrupan en dos, uno que comprende las *pérdidas terminales* o de reflexión en los terminales del cuadripolo, y otro que se denomina *pérdidas de interacción;* las primeras, como su nombre indica, se originan por reflexiones de las ondas en aquellos terminales, y las segundas se deben a la acción que ejerce el cuadripolo, sobre tales ondas durante su propagación.

Si nos referimos a la figura 285, en la que las dos impedancias de emisión y recepción son resistivas e iguales a R_o, caso el más corriente, la corriente en la carga antes de la inserción del cuadripolo valdrá

$$I_L = \frac{E}{2 \cdot R_o}$$

se puede demostrar que la corriente I'_L después de la inserción vale:

$$I'_L = \frac{2E\sqrt{Z_{i1} Z_{i2}}}{K(Z_{i1} + R_o)(Z_{i2} + R_o)} \times \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{K^2} \frac{Z_{i2} - R_o}{Z_{i2} + R_o} \frac{Z_{i1} - R_o}{Z_{i2} + R_o}\right)}$$

y entonces:

$$P \cdot I = 20 \log K + 20 \log \frac{R_o + Z_{i1}}{2\sqrt{R_o Z_{i1}}} + 20 \log \frac{R_o + Z_{i2}}{2\sqrt{Z_{i2} R_o}} +$$

$$+ 20 \log \left(1 - \frac{1}{K^2} \cdot \frac{Z_{i1} - R_o}{Z_{i1} + R_o} \cdot \frac{Z_{i2} - R_o}{Z_{i2} + R_o}\right)$$

el primer término representa las pérdidas de atenuación, el segundo y tercero, las pérdidas terminales o pérdidas por reflexión en cada uno de los extremos del cuadripolo, y el cuarto término las pérdidas por interacción. En particular, cuando las impedancias imágenes son iguales a R_o, es decir, para el equilibrio de impedancias, las pérdidas de inserción quedan reducidas a las de atenuación como era de esperar. Las pérdidas de interacción son físicamente originadas por las reflexiones múltiples de la energía en uno y otro extremo del cuadripolo a través de la estructura del mismo; su magnitud está determinada por dos factores: el desequilibrio de impedancias en los terminales, de un lado, y las pérdidas de atenuación, de otro; el primer factor determina la magnitud de las ondas componentes reflejadas en los terminales, mientras que el segundo interviene atenuando dichas ondas en su paso de un extremo a otro del cuadripolo. Cuando K es muy grande, como sucede en las bandas de atenuación de los filtros, el término de interacción es casi nulo, porque las ondas reflejadas son casi totalmente atenuadas.

XV. Deformaciones y amplificación en tensión y en potencia

Deformación y sus diversos tipos

Antes de entrar en el estudio de la amplificación en general, conviene dar una idea de las diversas formas que puede tener la deformación, en los circuitos que se deben emplear para la transmisión de las señales sonoras de la película, desde la fotocélula hasta los receptores o altavoces. Las ondas que forman la palabra, la música y los efectos sonoros, tienen una composición distinta de una que tenga una sola frecuencia, pues continuamente cambian de forma a razón de tiempos muy pequeños, lo que las da carácter completamente transitorio, y son precisamente estas partes variables del tren de ondas, las que constituyen la base de la naturalidad en la reproducción. De otra parte, después de la atenuación de esos estados transitorios, la onda presenta un aspecto de régimen permanente, y finalmente tenemos otra parte fuertemente transitoria en el momento en que la onda permanente comienza a ser perturbada o alterada; es, pues, necesario conservar estas cualidades transitorias y permanentes de la onda para que la reproducción del sonido tenga su carácter de realidad. Esto sólo puede lograrse con un sistema electroacústico que tenga una respuesta lo más amplia comercialmente posible en lo que a la escala de frecuencias se refiere, y, de otra parte, la transmisión de esos estados transitorios exige que el sistema acepte bandas de estados permanentes sobre una gama extremadamente amplia de frecuencias.

Estas deformaciones pueden tomar tres aspectos distintos, en todos o cada uno de los elementos que forman la cadena de transmisión antes citada: *a)* Deformación en frecuencia. *b)* Deformación en amplitud. *c)* Deformación por defasaje.

a) La *deformación en frecuencia* se produce cuando, por ejemplo, las características de los circuitos de entrada y salida de alguno de los elementos o eslabones de esa cadena, en relación con sus admitancias, (inversas de las impedancias), son tales que la proporcionalidad que debe existir entre las tensiones de entrada y de salida, no es igual para

todas las frecuencias, o, dicho de otro modo, la constante de proporcionalidad cambia con la frecuencia; para darnos una idea de tal deformación consideremos las figuras 286 y 287. La primera representa un caso de amplificación sin deformación en frecuencia, y en el que la señal de entrada tiene igual amplitud para todas las frecuencias del dominio a transmitir, y otro tanto sucede a las frecuencias de salida; es decir, la pendiente obtenida por secciones normales al eje de frecuencias es siempre la misma, por tratarse de un plano característico, paralelo a dicho eje; el valor de la amplificación depende precisamente del valor de aquella pendiente.

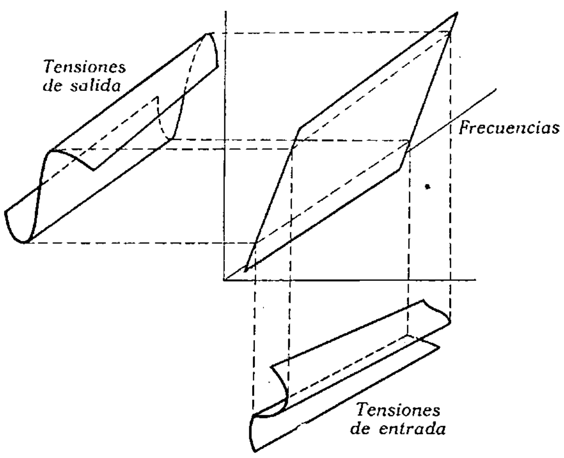


FIG. 286. Sin deformación en frecuencias

En la segunda figura, en cambio, la superficie característica no es un plano, sino uua, cuyas secciones por planos normales al eje de frecuencias tienen distinta inclinación; entonces, aunque para cada frecuencia se conserva la proporcionalidad entre las tensiones de entrada y salida, por ser esas secciones líneas rectas, como sus pendientes son distintas, también serán distintas las amplitudes de las tensiones de salida, aun cuando las amplitudes de las tensiones de entrada sean las mismas para todas las frecuencias. Este tipo de deformación se llama también deformación *lineal*, pero esta designación es poco feliz, pues ambas palabras tienen sentidos técnicamente contrapuestos, y su uso debe ser desterrado. Ella es tanto más difícil de eliminar cuanto más amplia es la gama de frecuencias a reproducir, y cuanto más elevado es el nivel de

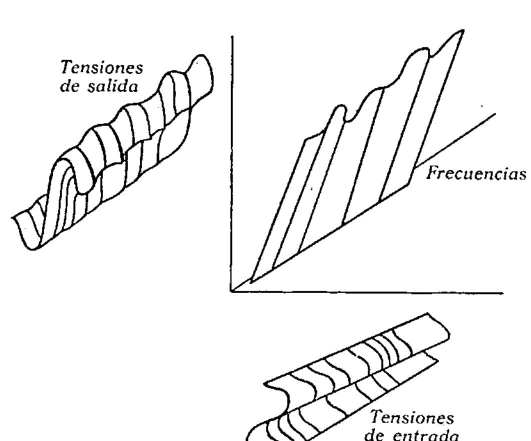


FIG. 287. Deformación en frecuencia

amplificación que se desea obtener en cada etapa de amplificación.

b) Mientras que en el caso anterior sólo se presentan en la salida las mismas frecuencias que en la entrada, en la *deformación en amplitud* pueden presentarse algunas frecuencias que no estaban presentes en el circuito de entrada, y tal tipo de deformación tiene lugar cuando, por alguna causa, no existe aquella proporcionalidad de que antes hemos hablado entre las tensiones de entrada y de salida; entre estas causas figura como más prominente la falta de linearidad (ser curvas en lugar de rigurosamente rectas) en las características de trabajo de las válvulas, y de aquí que casi todos los amplificadores de reproducción sonora sean a base de tríodos cuyas características son mas lineales trabajando en clase A. Otras causas de este tipo de deformación son el consumo del circuito de rejilla y el transformador de salida cuando trabaja con gran amplitud de magnetización; pues en las crestas puede quedar saturado.

Se puede demostrar que cuando no existe una relación lineal entre la entrada y salida de un circuito, cual sucede, por ejemplo, como decimos en las características de las válvulas, aparecen en la salida no sólo las frecuencias iniciales ν_1, ν_2, ν_n, sino también los armónicos de estas frecuencias $2\nu_1$, $3\nu_1$, $2\nu_2$, $3\nu_2$, y, además, términos de la forma $p\nu_i \pm q\nu_j$, en que p y q son dos números enteros y ν_i y ν_j dos de las frecuencias de entrada. La primera parte da lo que se llama *deformación por armónicos* (figura 288), y para su medida se adopta el criterio de Küpfmüller, según el cual, si llamamos a_1, a_2, a_3 las amplitudes correspondientes al tono fundamental de frecuencia ν_1 y las correspondientes a las frecuencias de los armónicos $2\nu_1$, $3\nu_1$, se llama *factor de deformación* por armónicos al número

$$D = \sqrt{\frac{a_2^2 + a_3^2 + \ldots + a_n^2}{a_1^2}} \times 100$$

expresado en tanto por ciento de la amplitud de la fundamental a_1, o bien también expresando ese número en decibelios debajo de la amplitud fundamental

$$D_{dB} = 20 \log \sqrt{\frac{a_2^2 + a_3^2 + — + a_2}{a_1^2}}$$

Para el segundo armónico, en el caso de una válvula tríodo, la expresión se calcula a partir de las características estáticas, tal como se dijo al hablar de la deformación en fotocélulas.

Los otros términos de la forma $p\nu_i \pm q\nu_j$ causan, en general, mayor perturbación en la reproducción de la señal que los armónicos, porque en la mayoría de los casos éstos *armonizan* con el tono fundamental, mientras que aquéllos son *discordantes* (véase Capítulo X); de otra parte, estos términos dan origen muchas veces a una modulación mutua entre dos frecuencias distantes de la gama, sobre todo si ésta, como es el caso, es amplia, y que recibe el nombre de *modulación cruzada* o, más propiamente, *intermodulación;* ella es la causa del

tono desagradablemente bronco o chillón que se observa en algunos equipos, especialmente cuando se escucha un coro o una gran orquesta, siendo de notar que hasta la fecha no se ha especificado

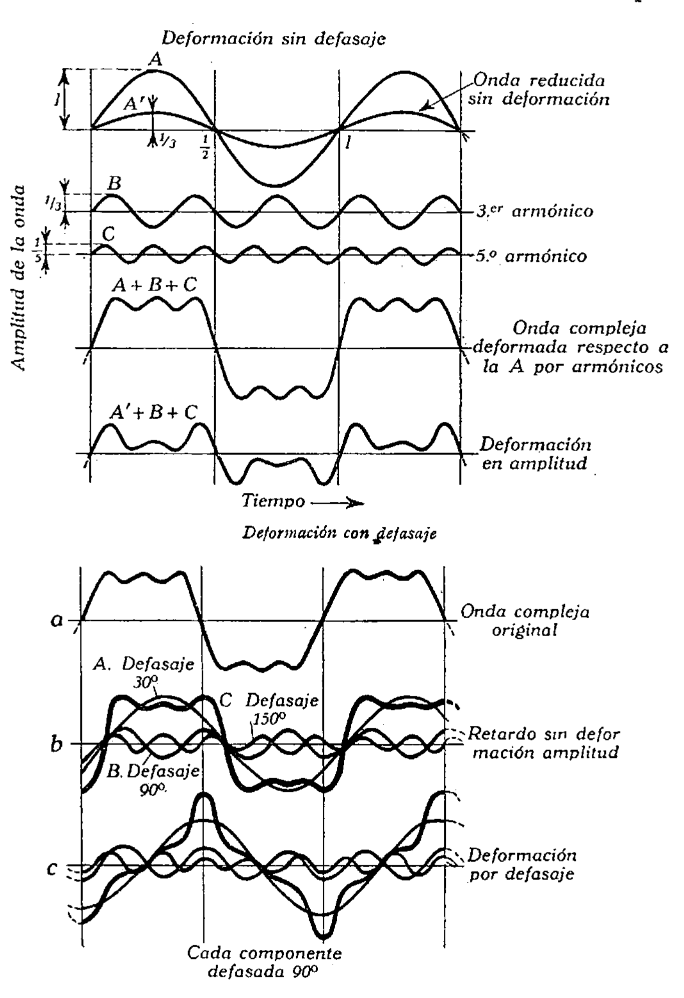


Fig. 288. Tipos de deformación

nada sobre el tope tolerable en este tipo de deformación a pesar de sus efectos perniciosos (¹). Se puede demostrar que si la característica de una válvula no es lineal y se limita su desarrollo a los tres primeros términos, es decir, la corriente en función de la tensión de rejilla, es expresable en la forma:

$$i_p = a + be_g + ce_g^2$$

(¹) Recientemente Western Electric ha lanzado al mercado dos aparatos que permiten analizar y medir la modulación cruzada en equipos de audiofrecuencia.

donde a, b y c son constantes, y se aplican a la rejilla dos tensiones de frecuencias $f_1 = \frac{2\pi}{\omega_1}$ y $f_2 = \frac{2\pi}{\omega_2}$ suficientemente alejadas [1] en la escala de frecuencias a reproducir; además de aparecer a la salida estas dos frecuencias y sus armónicos de pulsaciones $2\omega_1$ y $2\omega_2$, existen otros dos términos de pulsación, en $\omega_1 + \omega_2$ y $\omega_1 - \omega_2$ los cuales, combinados con la onda de pulsación ω_1, dan como resultado un término de la forma

$$bE_1 \left(1 + 2\frac{c}{b} E_2 \text{ sen } \omega_2 t\right) \text{ sen } \omega_1 t,$$

en la que E_1 y E_2 son las amplitudes de las dos frecuencias fundamentales de entrada. Este término o expresión nos muestra claramente (Capítulo XII) que la onda de frecuencia $f_1 = \frac{2\pi}{\omega_1}$ se encuentra modulada en amplitud por la de frecuencia $f_2 = \frac{2\pi}{\omega_2}$ y que la profundidad de modulación o su amplitud es $m = 2E_2 \frac{c}{b}$; depende de E_2 y de los coeficientes c y b, es decir, de la característica de la válvula. Esto mismo puede repetirse para un armónico $p\omega_1$ que podría ser modulado por la frecuencia $q\omega_2$ mediante la yuxtaposición de los términos cuyas pulsaciones fueran $p\omega_1 + q\omega_2$ y $p\omega_1 - q\omega_2$. Este tipo de intermodulación puede tener lugar por una falta de filtraje, y entonces la amplitud es modulada a 50 ó 100 c/s.

c) En los capítulos I y X vimos que un movimiento de propagación por ondas está caracterizado por una cierta velocidad de propagación entre dos puntos; las ondas o tensiones eléctricas que se propagan a lo largo de la cadena de eslabones comprendidos entre la fotocélula y los altavoces son, en general, complejas, es decir, que se pueden descomponer en una serie de tensiones eléctricas cada una de las cuales es sinusoidal, pero cuyas pulsaciones y velocidades de propagación a lo largo de dicha cadena varían de unas a otras. El resultado de esta desigual velocidad de propagación será que los tiempos empleados en llegar desde la fotocélula a los altavoces, por cada una de las componentes sinusoidales, serán distintos, o lo que es igual, cuanto mayor sea su velocidad de propagación llegarán antes, y las diferencias de fase relativas, si las había, que tenían entre sí estas distintas ondas componentes en el momento de salir de la fotocélula, se habrán alterado en el instante de alcanzar los altavoces. ¿Qué efecto tiene este cambio relativo de fase de las ondas componentes sobre la tensión total, resultado de la suma de aquéllas? En la figura 288 (parte inferior) se ve una onda de tensión, la que juntamente con sus armónicos 3.° y 5.° dan una tensión resultante, marcada en *a*. En *b* se observa que desplazando la primera 30°, el tercer armónico 90° y el quinto armónico 150°, al recomponer la tensión resultante de su suma, ésta conserva su

[1] Por ejemplo de 40 c/s y 8000 c/s.

forma, y lo único que se observa es que toda la tensión resultante se ha desplazado hacia la derecha 30°; en este caso *no hay deformación por defasaje.*

En *c*, en cambio, cuya figura se ha obtenido desplazando las tres componentes 90°, la tensión resultante ha sido profundamente deformada, de tal modo que sería imposible reconocer la que le ha dado origen; existe, pues, una profunda deformación originada por la alteración relativa de las fases con que llegan las diferentes tensiones componentes a los altavoces, que tiene su origen en la distinta velocidad de propagación, y esta deformación se llama por *defasaje.*

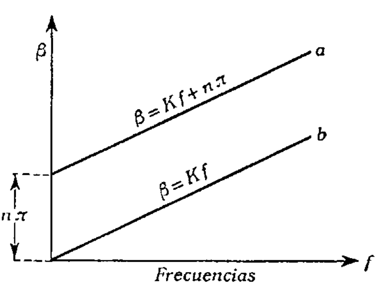


FIG. 289. Condición de no deformación. $\frac{\Delta\beta}{\Delta\omega} = k'$ con $\omega = 2\pi f$

De lo dicho concluímos que para que no exista deformación por defasaje se precisa que el tiempo de propagación que empleen las distintas tensiones componentes en propagarse desde la fotocélula a los receptores, sea el mismo para todas. En general, podemos decir que el efecto de esta deformación en la conversación es reducir la inteligibilidad y producir una pérdida de articulación; el efecto sobre la música es menor debido al carácter sostenido de las ondas sonoras musicales.

¿En qué forma se podrá traducir sobre las ondas esa condición de igualdad en el tiempo de propagación de las componentes? En el ejemplo anterior hemos visto que si era ω la pulsación de la tensión fundamental y ésta se desplazaba 30°, el armónico tercero, cuya pulsación sería 3ω, había que desplazarlo (para que no hubiera deformación) $30 \times 3 = 90°$, y el armónico quinto había que desplazarlo $30 \times 5 = 150°$, y, en general, si hubiera un armónico $n\omega$, habría que desplazarlo $30° \cdot n$; es decir, llamando β a este ángulo de defasaje, debe ser $\beta = k\omega$, lo que quiere decir que el *ángulo de fase debe ser proporcional a la pulsación o, lo que es igual, a la frecuencia,* siendo k la constante de proporcionalidad, o bien como $\omega = 2\pi f$ será $\beta = 2k\pi f = Kf$. Esto último es válido para el caso de ondas de tensión en régimen permanente; es decir, que su forma y aspecto se mantiene constante con el tiempo, como es el caso de la figura en *b*.

Para la transmisión de ondas de tensión *en período transitorio* (o sea que no cumplen la condición anterior) sin deformación, no basta la condición anterior; la igualdad en el tiempo de propagación lleva consigo el que el defasaje, además de ser proporcional a la pulsación o frecuencia, sea igual a $\pm \pi \cdot n$ (donde $n = 1, 2, 3...$) cuando dicha frecuencia sea cero, lo cual quiere decir que si se representa gráficamente el defasaje en función de la frecuencia, la gráfica sea la de la figura 289 *a*, en lugar de la *b* que teníamos antes. Entonces, cuando se aplica una señal a un sistema que cumple con esta condición, en el extremo

receptor no se recibe nada hasta que pasa un período definido, después del cual todas las tensiones componentes adquieren instantáneamente el valor de régimen permanente. La señal recibida será semejante a la transmitida, salvo el *defasaje constante* introducido por la propagación; es el caso de la figura 288 *b* y lo que muestran también, dentro de la aproximación posible, las distintas frecuencias en la figura 290. Este defasaje constante para todas las frecuencias *no es percibido* por el oído, según demostró experimentalmente Helmholtz, y puesto que ello es así, podemos admitir que la deformación de fase ocurre solamente en los períodos de transición. De aquí resulta que un sistema puede ser lineal en cuanto a su respuesta en frecuencia, tal como se obtiene de las medidas de ganancia en frecuencia (régimen permanente), y, sin embargo, puede originar deformaciones semejantes a las de un sistema que no sea lineal (fig. 289), cuando las condiciones normales de su trabajo no mantienen ese régimen permanente. Tal es el caso del circuito de la figura 291, correspondiente a un amplificador de registro, banda ancha, cuyo defasaje entre cero y 400 c/s se muestra en la figura 292, y en la que se ve claramente que no es una línea recta y, por tanto, hay deformación por esta causa.

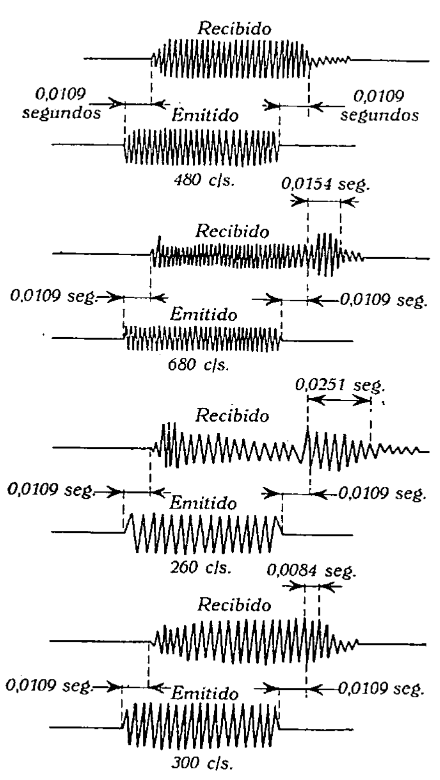


FIG. 290. Oscilogramas de frecuencias de un filtro de paso de banda entre 350 y 600 c/s

Este defasaje o retardo para señales de alta frecuencia se percibe mejor que para las bajas frecuencias debido al mejor poder de definición del oído para las altas frecuencias. Experimentalmente se ha visto que el retardo máximo en la banda de 5000 a 8000 c/s no debe exceder en más de 5 ó 10 milisegundos al retardo correspondiente a los 1000 c/s; igualmente, el retardo a 50 c/s puede exceder al de 1000 c/s, a lo más en 75 milisegundos, sin que se perciba deformación apreciable en la calidad del sonido por esta causa. En general, podemos decir que una capacidad en serie y una inductancia en paralelo aumentan el retardo tanto más cuanto mayores sean sus valores en las bajas frecuencias; por el contrario, una inductancia en serie y una capacidad en paralelo lo aumentan para las altas frecuencias también tanto más a medida que aumentan sus valores.

Finalmente, en la figura 290 se observa que, antes de alcanzar el régimen permanente, se obtienen en la recepción oscilaciones que van aumentando de valor en amplitud hasta alcanzar aquel régimen; es evidente que el retardo en la propagación dependerá del período de crecimiento de esas oscilaciones hasta alcanzar dicho estado, y precisa-

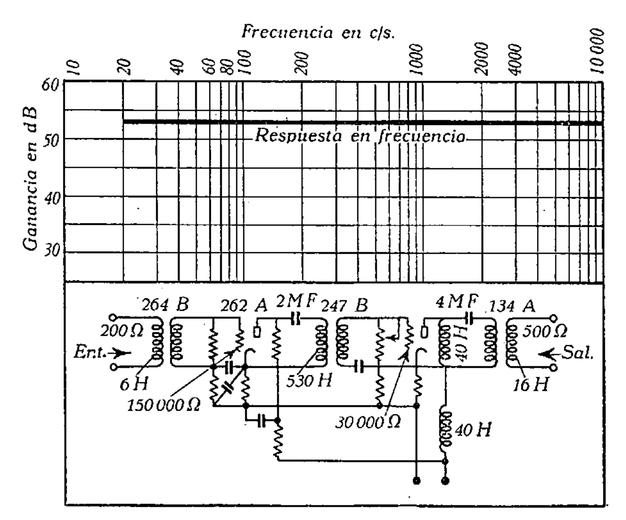


FIG. 291. Diagrama y característica de frecuencias de un amplificador de registro, banda ancha

mente cuando se trata de una tensión sinusoidal pura, se puede demostrar que si se toma como medida de ese período, el tiempo necesario para que la amplitud alcance el 50 % del valor de la amplitud en régimen permanente, ese tiempo vale siempre $t = \frac{\Delta \beta}{\Delta \omega}$ y la pendiente de crecimiento es inversamente proporcional a $\sqrt{\frac{d^2\beta}{d\omega^2}}$. Ese valor $t = \frac{\Delta \beta}{\Delta \omega}$ se toma por definición como medida del retardo, en aquellos sistemas sin deformación con respecto a la característica de frecuencias, y cuando el sistema no cumple la condición de proporcionalidad a que antes hemos aludido, se toma como medida de la deformación o *factor de deformación* por defasaje el valor

$$M_\omega = \left(\frac{\Delta \beta}{\Delta \omega}\right)_\omega - \left(\frac{\Delta \beta}{\Delta \omega}\right)_{\omega_0}$$

diferencia entre las pendientes de defasaje para la frecuencia a que se considera la deformación $f = \frac{\omega}{2\pi}$, y esta misma pendiente para la

frecuencia que lo tenga mínima dentro de la gama de frecuencias a transmitir [1] $f_o = \frac{\omega_o}{2\pi}$; en tales casos hay retardo y deformación.

La figura 293 representa el retardo en función de la frecuencia dentro de la gama de 0 a 8000 c/s de un sistema reproductor. En ella,

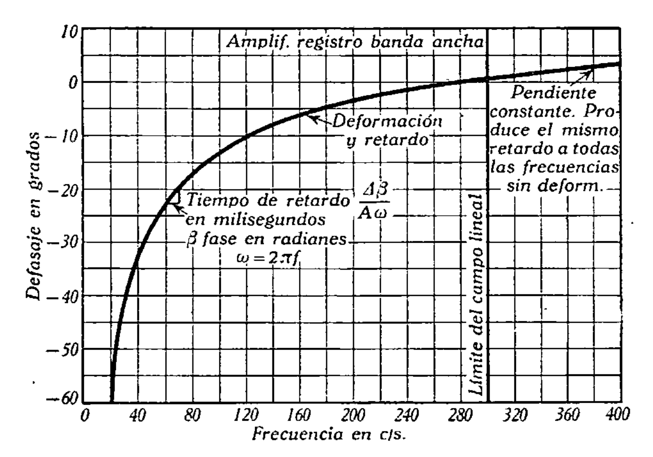


FIG. 292. Curva de defasaje de la figura anterior desde 0 a 400 c/s

el factor de deformación es la diferencia entre la ordenada correspondiente a una cierta frecuencia y la mínima de la curva. El retardo medio es en ella de unos 350 μ/s y hasta los 7500 c/s la desviación máxima no excede de los 1250 μ/s.

Amplificación y atenuación

La potencia de salida que se recoge en la carga de la fotocélula R_L cuando ésta trabaja en el régimen alternativo usual en los equipos de reproducción sonora, vale, llamando I la amplitud máxima de la corriente modulada de ánodo de la fotocélula,

$$W_1 = \frac{R_L\, I^2}{2} = \frac{0{,}5 \times 10^6 \times 25 \times 10^{-12}}{2} = 6{,}3 \times 10^{-6} \simeq 6{,}0\ \mu\mathrm{W}$$

suponiendo que tal carga sea de 0,5 MΩ y que aquella corriente no exceda de 5 μA, valores muy corrientes; podremos redondear esta ci-

[1] Además de los correctores de fase que se utilizan al objeto de corregir este tipo de deformación y que no caben dentro de los fines de esta obra, la realimentación negativa ofrece medios de corregir tal deformación, y de ello damos una idea en nuestro trabajo *Realimentación negativa y características compuestas.*

fra tomando 5 μW, para tener en cuenta las pérdidas en altas frecuencias, etc. Ahora bien, ya hemos visto en el Capítulo XI que para llenar un salón de espectáculos con un volumen conveniente de sonido, hace falta tener unos altavoces de suficiente potencia y rendimiento electroacústico, y que la potencia eléctrica que debemos prever, la cual depende de las dimensiones y características del teatro, puede llegar a valer hasta 240 W; resulta, pues, que entre la salida de la fotocélula y la entrada de los altavoces o receptores se precisa salvar un desnivel de potencia de

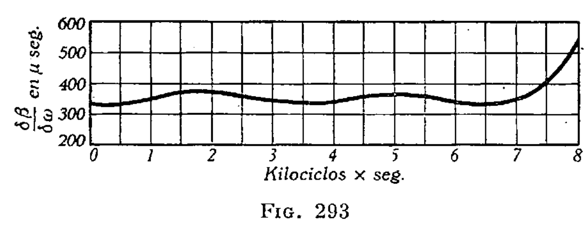


FIG. 293

$$D = 10 \log \frac{W_2}{W_1} = 10 \log \frac{240}{5 \cdot 10^{-6}} = 10 \log 48 \cdot 10^6 = 60 \log 48 \simeq 100 \text{ dB},$$

y esto se consigue intercalando lo que se llama un *sistema amplificador*, que nos dé una potencia máxima de 240 W aproximadamente correspondiente a aquel nivel final [1].

Pero no siempre el sistema amplificador debe suministrar una potencia tan grande, o, como suele decirse, habrá de trabajar *a plena potencia*; en primer lugar, porque la fabricación de equipos económicos exige dos o tres valores fijos en la potencia de los equipos de una misma firma, cuyos valores se eligen de modo que pueda cubrirse con ellos la mayoría de los locales que es más probable construir, y, por consiguiente, cuando la potencia de un equipo instalado en un local sea excesiva, habrá que reducir esa potencia, o, empleando una palabra más técnica, *atenuarla*, hasta reducirla al valor adecuado determinado por las gráficas del Capítulo XII. Por otra parte, no todas las películas vienen registradas al mismo nivel sonoro, para dar igual nivel de salida en la fotocélula, ni siquiera lo tienen en general las distintas partes o rollos de una misma película (y en casos extremos varía aun en el mismo rollo), ni los distintos pasajes de una película deben reproducirse a igual nivel; aun teniendo en cuenta que tales variaciones procuran efectuarlas las casas productoras en el registro, ya hemos visto en el Capítulo XI que en las mismas colas de las películas están previstos cuadros para indicar la más adecuada posición del Fader o atenuador regulable. La existencia de un mayor o menor número de espectadores en la sala es otro factor que tiene una influencia decisiva en el volumen sonoro necesario en la misma, especialmente en locales en que los asientos son poco absorbentes, pues todos los operadores

[1] Como siempre, el nivel cero corresponde a 6 mW sobre una impedancia de 500 Ω.

saben perfectamente que cuando la sala está llena necesitan elevar un poco el Fader, es decir, dar mayor potencia a los altavoces que cuando está vacía o mediada; finalmente, hay que atender en ciertos casos los deseos, no siempre artísticamente justificados, del empresario que se acostumbra a veces a un nivel sonoro en su local y desea pasar toda la película a ese promedio de nivel. De todas estas consideraciones se deduce que, además del sistema amplificador, se necesita un *sistema atenuador* que reduzca según las necesidades la potencia de salida del sistema amplificador. Amplificar y atenuar son, pues, dos funciones inversas, aunque realizadas por órganos diferentes, y así como la medida de la primera representa una *ganancia* expresable en decibelios, la medida de la segunda introduce una *pérdida*, que representa la relación entre la potencia antes de la atenuación y la potencia después de esa atenuación expresada en decibelios; ambas pérdidas y ganancias tienen signos opuestos; así: una ganancia de 5 dB y una atenuación de —5 dB aplicadas en conjunto a una señal cualquiera la dejan invariable; las atenuaciones o pérdidas pueden considerarse, pues, como ganancias negativas, y, recíprocamente, las ganancias o amplificaciones son pérdidas negativas.

Las necesidades prácticas de los sistemas de reproducción han obligado a establecer tanto uno como el otro medio de variar la ganancia, escalonado o por secciones; así, la conveniencia de trabajar con dos máquinas exige colocar, en cada una, una primera etapa de amplificación o *amplificador previo*, que recoge la señal o tensión de la fotocélula a un nivel de aproximadamente —30 dB (con respecto al nivel de referencia de 0,006 W) y la eleva aproximadamente hasta el nivel +10 dB; es decir, que le suponemos una ganancia de aproximadamente unos 40 dB; en estos amplificadores previos conviene tener también una primera etapa de atenuación, a fin de igualar el valor de la señal de salida, que, por envejecimiento de válvulas, mal ajuste de sistemas ópticos, caída de excitadoras, etc., puede provocar un desequilibrio entre ambas máquinas, de carácter transitorio o permanente.

Los amplificadores previos excitan otro *amplificador común o principal* a través de la *sección regulable de atenuación o «Fader»*, que permite regular esa excitación en un margen de unos —70 dB, por pasos de 3 en 3 dB, salvo en los de máxima atenuación, en que el salto es mayor con el fin de que el cambio de máquinas se haga con más facilidad (recuérdese que se aconseja en el registro atenuar el sonido en los principios y finales de cada parte). Este fader debe encontrarse en la cabina y siempre a mano del operador, quien de este modo podrá regular fácilmente la excitación según la escena. El amplificador principal suele estar constituído por una o más etapas de amplificación en *tensión* o voltaje, y una etapa final *de potencia;* es en alguna de las etapas de tensión de este amplificador donde se coloca una tercera sección de atenuación para adaptar el equipo al volumen o características especiales de la sala (fig. 294).

Esta distinción entre amplificadores o etapas de tensión y etapas de potencia es esencial; los primeros tienen por misión aumentar suficientemente la tensión de señal que se aplica a su entrada, sin tener en cuenta para nada su potencia eléctrica, mientras que en los segundos es esta potencia modulada obtenida a la salida lo que interesa aumentar cuanto sea posible; en los primeros, se procura una gran ganancia en tensión, sin preocuparnos de la corriente modulada en la

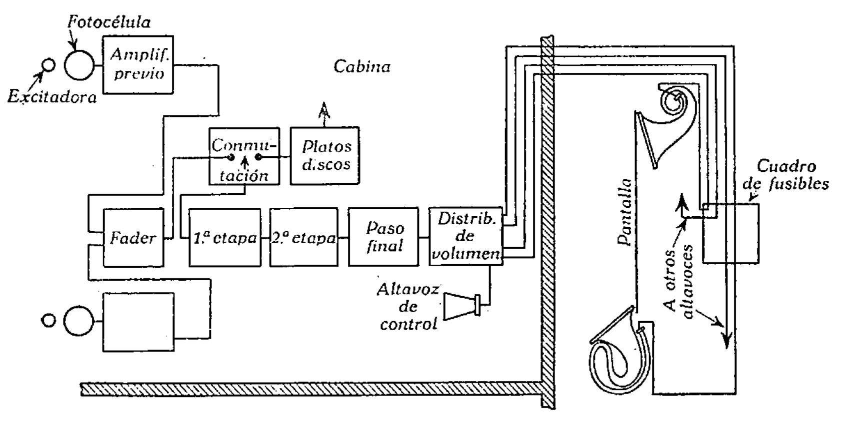


FIG. 294

salida, mientras que en los segundos es ésta la que desempeña el papel principal. Para darse cuenta de lo que significa esta clasificación, bastará considerar un caso concreto; por ejemplo, la válvula $6L6$, corrientemente empleada con la etapa de salida de los amplificadores. Para que una lámpara de salida dé toda la potencia que es capaz y según se establece en los catálogos, se precisa aplicarle a la rejilla una tensión alternativa de amplitud suficientemente grande, también especificada la mayoría de las veces por el fabricante; cuando la tensión aplicada a la rejilla es inferior a ese valor, disminuye grandemente la potencia de salida. Así, en la citada válvula, para una tensión de 300 V en placa y con una carga de ánodo de 4500 Ω, puede proporcionar una potencia de salida de 6,5 W, lo que representa un nivel de aproximadamente 30 dB, pero esto sólo a condición de que la tensión modulada de excitación en rejilla tenga una amplitud máxima no inferior a 12,5 V; es decir, sólo con esa excitación de 12,5 V trabajará esta válvula a su plena potencia. Sería, pues, inútil tratar de aplicar directamente a su rejilla la tensión modulada recogida a la salida de nuestra fotocélula, que vale $0{,}5 \times 10^{6} \times 5 \times 10^{-6} = 2{,}5$ V, porque dicha válvula apenas sería sensible a tal tensión y, en todo caso, sólo una fracción muy pequeña de los 6,5 W lograríamos con tal excitación. Necesitamos, pues, una o varias etapas amplificadoras en tensión; es decir, que nos produzcan una ganancia en tensión de $G = 20 \cdot \log \frac{12{,}5}{2{,}5} = 20 \log 5 = 14$ dB apro-

ximadamente ([1]), con lo cual habremos logrado elevar el nivel de los 2,5 V al de los 12,5 V; es decir, dispondremos a la salida de la última etapa en tensión, sobre su circuito de placa, de los 12,5 V precisos, y, con ello, el nivel de —30 dB de salida, de nuestra fotocélula, se habrá elevado en total unos 60 dB en lo que a potencia se refiere. Vemos, pues, en resumen, que el papel que desempeñan ambos amplificadores es muy distinto, y también son distintos los principios que rigen su diseño. La figura 294 bis muestra un diagrama de los elementos de la cadena a lo largo de la cual sufre la energía eléctrica sus diversos cambios de nivel y transformaciones de energía luminosa en eléctrica y de ésta en sonido ([2]).

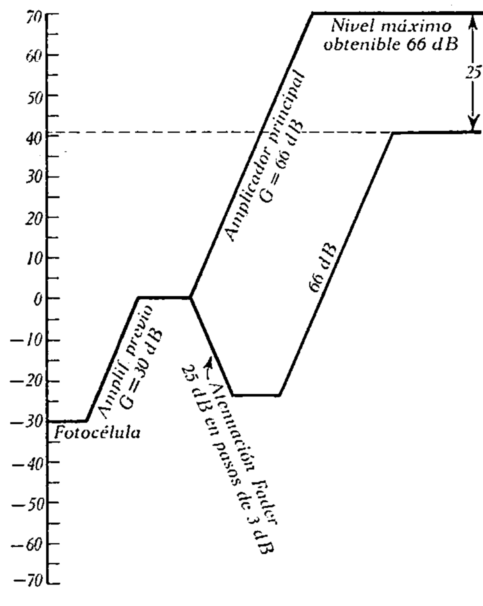


FIG. 294 bis

Amplificación en tensión

En definitiva y limitándonos por ahora al estudio del amplificador, cabe distinguir: *a)* amplificadores previos; *b)* amplificadores de tensión, y *c)* amplificadores de potencia. Esencialmente, *a)* y *b)* no se diferencian más que en sus impedancias terminales y en el nivel de la señal que circula por ellos, pues todos los amplificadores previos son amplificadores de tensión, pero en los que hay que tomar determinadas precauciones. La ganancia en tensión de un amplificador, llamada también muchas veces *ganancia de inserción*, representa la amplificación lograda con el amplificador intercalado en el circuito, comparada con la que se obtendría si el amplificador fuera eliminado del circuito y acopladas directamente las dos secciones de éste. Si son Z_t y Z_r las impedancias terminales de esas secciones, la ganancia de inserción del amplificador se obtendrá comparando la relación de tensiones en Z_t cuando el amplificador está insertado entre ellas, con la que se obtendría, conectando directamente

([1]) Véase las observaciones hechas más adelante en este capítulo relativas a ganancia en tensión y en potencia, cuando las impedancias en que se miden las tensiones no son iguales; en nuestro caso suponemos la impedancia entrada de la 6 *L* 6 igual 0,5 $\mu\Omega$, que es la de la célula fotoeléctrica, aun cuando no sea así.

([2]) Los diversos niveles no se refieren en la figura al caso de la válvula 6 *L* 6, sino a otro caso convencional.

ambas impedancias en paralelo. Si ambas son iguales, esta comparación nos da la ganancia del amplificador, pero si son distintas, tendremos que tener en cuenta el factor corrrectivo de impedancias de que hablamos en el Capítulo XIV, $\sqrt{\frac{Z_t}{Z_r}}$.

Si se llama Z_1 y Z_L las impedancias de entrada y carga de una etapa o paso de amplificación, cabe distinguir en él su *ganancia neta* en tensión, que se expresa en decibelios a partir de la relación ya encontrada antes:

$$\frac{u_p}{e} = \frac{\mu Z_L}{R_i + Z_L}$$

y su *ganancia en tensión referida al nivel cero* o simplemente *ganancia* en la que se tiene en cuenta el factor correctivo de impedancias, la cual se expresa en decibelios a partir de la expresión:

$$\frac{u_s}{u_e} = \frac{\mu Z_L}{R_i + Z_L}\sqrt{\frac{Z_1}{Z_L}} = \frac{\mu \sqrt{Z_1 Z_L}}{R_i + Z_L}$$

$G_{dB} = 20 \log \frac{\mu \sqrt{Z_1 Z_i}}{R_i + Z_L}$ o con nuestra notación $G_{dB} = 20 \log \mu' \sqrt{\frac{Z_1}{Z_L}}$

En ambos casos, se ve la conveniencia de elegir válvulas en que μ sea lo mayor posible, si bien esto en la mayoría de los casos lleva consigo una gran resistencia interna.

Amplificadores previos. Como hemos visto hace poco, la señal que recogen de la fotocélula es de unos 6 μW, lo que representa un nivel de —30 dB, y se comprende fácilmente que cualquier tensión interferente que pueda introducirse en su entrada, aun cuando sea muy débil, hablando en términos generales, puede tener con mucha facilidad un nivel igual o superior al de nuestra señal de la fotocélula y, por consiguiente, perturbar nuestro sistema de transmisión en una medida superior a la que produciría si el mismo nivel de señal perturbadora se introduce en un eslabón posterior de la cadena de transmisión donde la señal de la película ha alcanzado ya un nivel relativamente elevado respecto a la tensión perturbadora. De aquí la necesidad de proteger nuestros previos, mediante blindajes y pantallas electrostáticas, contra todo agente perturbador y no sólo contra éstos, sino que estando, como generalmente suele suceder, situados en las máquinas que arrastran la película, sometidas a una continua vibración, hay interés en reducir ésta todo lo posible, de una parte, y de otra, montar esos previos en soportes antivibratorios de goma o muelles, a fin de que no lleguen especialmente a sus lámparas tales vibraciones; éstas modifican de un modo periódico las distancias relativas de sus electrodos por efecto de tales vibraciones, lo cual cambia en la misma

forma los parámetros característicos de la lámpara μ, G_m, R_i, dando lugar a la producción de una tensión que modula la que debe ser amplificada, originando perturbaciones y ruidos; este efecto de *microfonicidad* lo presentan a veces más acusado unas válvulas que otras aun siendo del mismo tipo, y de aquí que sea siempre conveniente una selección atendiendo a este efecto y se acusa notablemente mediante un ligero golpe en la ampolla de la válvula, dado con el dedo.

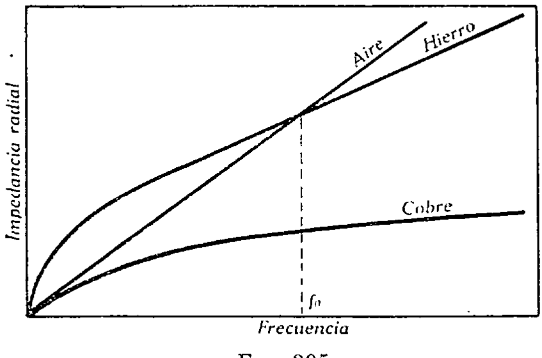
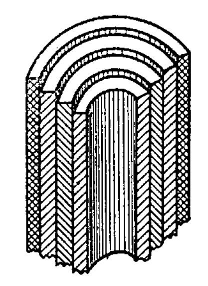


FIG. 295

Blindajes. La eliminación de los efectos de captación de señales parásitas y cruce de líneas o elementos de circuitos es una cuestión bastante difícil en la práctica y tiene gran interés en previos y líneas con señal de bajo nivel, aunque teóricamente baste apantallar aquellas partes en las que se presuma pueden ejercerse tales efectos. La eficacia de la pantalla electrostática está fundada en la idea de admitir que el movimiento de energía, normalmente a los conductores que forman los circuitos, y que constituyen la causa de la captación de señales perturbadoras, se efectúa según las mismas leyes básicas que gobiernan las transmisiones en el conductor. Según tal idea, las perturbaciones electromagnéticas se inician en los conductores y se propagan radialmente al exterior a través del espacio que rodea a éste, constituyendo dicho espacio la primera sección de una línea de radiotransmisión. Esta línea de radiotransmisión llega hasta la pantalla y en las dos superficies, exterior e interior de la pantalla, las características eléctricas de la misma experimentan un cambio brusco, de tal modo que, fuera de la pantalla, la línea de radiotransmisión se extiende en todo el espacio, pero si está la pantalla correctamente construída, muy poca es la energía capaz de alcanzar la sección de la línea de radiotransmisión incluída dentro de la pantalla y, por consiguiente, el conductor dentro de ella. Las ondas electromagnéticas, en su progresión a través de las substancias metálicas se atenúan más o menos según la frecuencia de las mismas, la permeabilidad y la conductibilidad del metal, transformándose el resto de la energía perdida en calor.

Ahora bien, la eficacia de una pantalla es debida no solamente a la atenuación originada en el metal por una verdadera absorción de energía, sino también por una *reflexión* que se realiza en el entorno de la pantalla debida al desequilibrio de impedancia *radial*, o en el sentido de la propagación de la onda, entre la pantalla y el material aisla-

dor que la rodea. En la figura 295 se ve que la impedancia radial del cobre es mucho más baja que la del aire, lo que significa que mientras a una determinada frecuencia f_0 no hay reflexión entre el hierro y el aire, sí la hay, y grande, entre el cobre y el aire. Para darse clara cuenta de este efecto basta considerar la pantalla formada por capas alternadas superpuestas de cobre y hierro (fig. 296); mientras que las pérdidas por atenuación de la onda perturbadora no son influenciadas por la disposición de las capas de la pantalla, la eficacia de ésta es mucho mayor cuando la capa exterior es de cobre, debido a las mayores pérdidas por reflexión entre el cobre y el aire.


Fig. 296

Observando la figura 295, se encuentra una diferencia esencial entre las pantallas de materiales magnéticos y las de los no magnéticos; a las bajas frecuencias los materiales magnéticos son muy eficaces, como se desprende de la diferencia de ordenadas entre el hierro y el aire en la figura, pero esta eficacia va disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia hasta alcanzar la frecuencia f_0 en que dicha eficiencia es mínima; después nuevamente aumenta, y para frecuencias suficientemente altas llega a ser superior a la de materiales no magnéticos. Esta característica es debida a la citada propiedad anterior de desequilibrio de impedancias radiales; para materiales no magnéticos, tal desequilibrio es grande, excepto para la frecuencia cero, y según muestra la figura 295, va creciendo a medida que aumenta la frecuencia, mientras que para las pantallas magnéticas, el desequilibrio de impedancias es grande para las bajas y altas frecuencias, pero puede ser muy pequeño para ciertos valores intermedios de la frecuencia.

Cruce aparente. Ya hemos hablado antes, en el Capítulo XIV, de la existencia de una unidad para medir el cruce aparente entre líneas o entre dos elementos de circuitos, y hemos dicho que tenía gran interés este tipo de perturbación cuando el nivel de las tensiones o corrientes en la línea de transmisión era bajo, como sucede en los amplificadores previos; es ello la razón por la que casi todas las conexiones exteriores conviene hacerlas entre las distintas etapas de amplificación con conductores bajo plomo. Podemos darnos una idea de los efectos de captación de estas corrientes, que se llaman *longitudinales* algunas veces, mediante la figura 297, donde la inducción de líneas exteriores origina corrientes del mismo sentido en los dos conductores que marchan paralelos, cerrándose el circuito para ellas en algún sitio (como, por ejemplo, una toma de tierra). Si la impedancia ofrecida a estas corrientes es elevada o si hay un desequilibrio de impedancias entre ambos hilos de la línea, estas dos corrientes no se cancelan o anulan completamente y pueden dar lugar, en el primario de T_2 y, por consiguiente, en su secundario, a una tensión de dife-

rencia que, aunque sea débil, si las corrientes longitudinales no están muy desequilibradas por el desequilibrio de las impedancias, sean lo suficientemente fuertes para producir una perturbación. Esta perturbación se manifiesta, como es natural, porque se produce en el secundario de T_2 una tensión que sigue el ritmo de la corriente en la línea

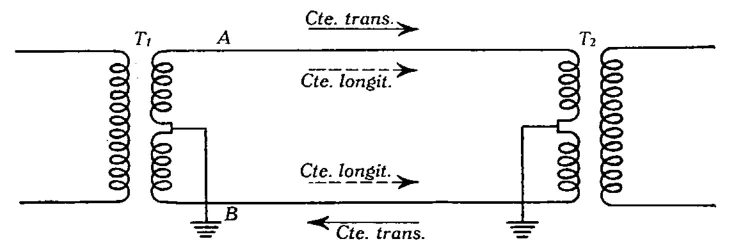


FIG. 297. Modo de reducir corrientes longitudinales

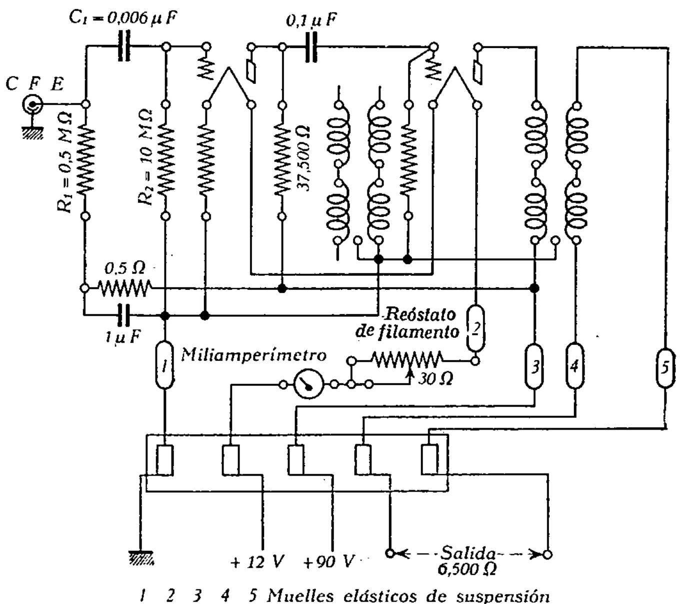


FIG. 298

exterior que ha producido la inducción perturbadora, y si ésta es una línea de audiofrecuencia, se percibe en la salida de ese transformador, superpuesta a la corriente que produce del primario de T_1, la audiofrecuencia de la línea perturbadora, creando el efecto aparente de un cruce entre ambas líneas, y de aquí su nombre. El efecto es, sobre todo, muy marcado cuando la línea de audiofrecuencia se encuentra expuesta a líneas de energía o alimentación, pudiendo tomar esas corrien-

tes longitudinales valores relativamente grandes; tal es el caso en los sistemas de reproducción de sonido con las líneas de alimentación de alterna de otros circuitos, si caminan dentro del mismo tubo en que suelen llevarse los conductores; la manera de evitarla es, además de pantallear la línea de transmisión de sonido, equilibrar bien la línea en sus dos mitades en lo que a impedancia se refiere, y también las mitades de los transformadores tanto primario como secundario, dándoles un camino fácil a tierra, como se indica en la figura 297, por la toma central del primario, a fin de reducir todo lo posible la impedancia para ellas de ambas líneas y por ello la tensión diferencial inducida.

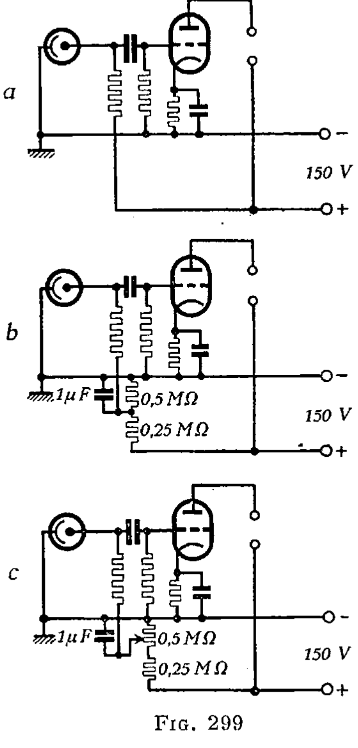


FIG. 299

Acoplamiento de los previos. Como hemos dicho ya, es la impedancia de entrada de los previos una característica esencial de los mismos, la cual depende del elemento con el que se ha de acoplar. Por regla general, suele estar acoplado a un micrófono o a una fotocélula, en los equipos de registro y reproducción sonora respectivamente.

La potencia de salida de las fotocélulas ya hemos visto que era muy baja, unos —30 dB, y otro tanto sucede con los micros, la cual oscila entre —65 a —75 dB, para una presión de 10 dinas por cm², en una carga de 250 Ω y para un nivel de referencia de 12,5 mW; es decir, también es muy baja. Veamos ahora sus impedancias: ya hemos dicho que las de las fotocélulas son muy grandes; aun para células gaseosas, alcanza las centenas de millar, expresada en ohmios, y para los micros de cristal y condensador llega a los 15 000 ó 40 000 Ω; de modo que en tales casos, puede hacerse un acoplo directo mediante la intercalación del conveniente condensador de bloqueo o separación de tensiones, con la rejilla de la primera válvula del previo. Reduciéndonos ahora concretamente al caso de fotocélula de los equipos de reproducción, ya hemos visto, al ocuparnos de la capacidad interna de la fotocélula, cuáles eran los factores que gobernaban la ganancia, y nos toca ahora ver la manera de hacer ese acoplo a la rejilla. El modo típico de hacerlo se encuentra en la figura 298, mediante el condensador de bloqueo C_1, y la resistencia R_2 de 10 megohmios, que recogen la tensión de salida de la fotocélula de la resistencia de carga R_L, representada ahora en la figura actual por $R_1 = 0,5$ megohmios. El sis-

tema formado por C_1 y R_2 en serie, se encuentra en paralelo sobre la resistencia de carga $R_L = R_1$, y tiene en total una impedancia suficientemente grande frente a R_L para que actúe como un potenciómetro del cual sólo la tensión desarrollada a través de R_2 se aplica a la rejilla de la primera válvula; tensión tanto menor cuanto mayor sea la influencia de la capacidad de C_1; es decir, *para las bajas frecuencias habrá una reducción de tensión en R_2 de cierta consideración*. Este decrecimiento de la tensión de entrada aplicada a la rejilla de dicha primera válvula, puede calcularse a partir de la expresión:

$$\gamma = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + 1/C_1^2(2\pi f)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

$$\text{con} \quad \omega_c = \frac{1}{C_1 R_1}$$

que nos da la fracción de la tensión desarrollada en la carga R_1, que se recoge en la resistencia R_2. De este modo podremos calcular y construir la respuesta semejante, en cuanto a su forma, a una de las de la pág. 423, figura 306, para los valores de C_1 y R_2 marcados en la figura 298, a las bajas frecuencias (¹). Si R_2 fuese más pequeña, C_2 debería incrementarse, con el fin de mantener una buena reproducción de las notas bajas, en lo cual no habría grave inconveniente con tal de que la resistencia de aislamiento del condensador C_1 sea suficientemente grande. La figura 299 muestra el sistema y valores prácticos empleados en algunos casos con fotocélulas Philips, ideados para mantener con exactitud la tensión de ánodo de la fotocélula, que, como sabemos, tiene marcada influencia en el caso de las gaseosas generalmente usadas. Más adelante, cuando veamos el acoplo por resistencias o impedancias de válvulas de tensión, se encontrará una gran semejanza con este caso.

El otro caso de acoplo a la entrada del previo, corresponde a algunos tipos de fotocélulas de baja resistencia de carga, o lo que es más frecuente, de líneas de transmisión de baja impedancia (Capítulo XVII) y aun micros dinámicos o de cinta, cuyas impedancias descienden hasta los 50 Ω (bajo las mismas condiciones que los anteriores) (²). Para tales micros, el acoplamiento se hace generalmente mediante un transformador elevador tal que la impedancia reflejada en el secundario sea sensiblemente igual a la impedancia de entrada de la válvula, mientras que en caso de la fotocélula, y dado que el amplificador general se suele encontrar a alguna distancia de la máquina donde se encuentra la cabeza sonora, se acopla la fotocélula a una línea de 500 Ω, por medio de un transformador; con ello se consigue (véase Capítu-

(¹) Bastaría, en efecto, reemplazar en la figura 306 el valor de la imductancia, por el de la capacidad c_1.
(²) Véase nuestra obra *Equipos de baja frecuencia*, en preparación.

lo XVII) —por el valor de esta impedancia de 500 Ω— mantener la tensión a transmitir suficientemente alta, frente a las tensiones inducidas, que por las causas que dijimos antes u otras perturbadoras, se pudieran originar en ella. Al otro extremo de la línea se coloca otro transformador elevador desde 500 Ω, a la impedancia de rejilla de la válvula de entrada del previo. El acoplo entre las dos válvulas que suelen formar el amplificador previo suele hacerse bien a resistencias o por transformador según las ideas que indicaremos después.

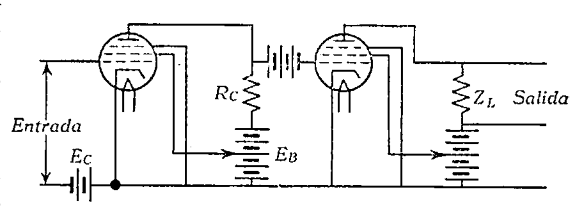


FIG. 300. Acoplo directo a resistencia con pentodos

Acoplamiento entre etapas de tensión. Como en esta obra no perseguimos la finalidad de dar la teoría completa de la amplificación, limitaremos su estudio a los tipos más frecuentes de acoplamiento que se utilizan en los sistemas sonoros, indicando sus características esenciales, especialmente en lo que se refiere a cómo varía la amplificación con la frecuencia, o, como suele decirse, la *respuesta del amplificador a las frecuencias*, de forma que sirva al lector de iniciación para un estudio más completo —si así lo precisa— en obras consagradas a su estudio, y de las cuales estimamos muy recomendable la de Terman, a la que se sigue aquí en sus líneas generales. Los tipos más corrientes son el acoplo directo a resistencias, el de resistencia condensador, el de impedancia, y el de transformador (1).

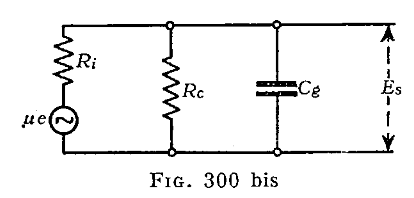
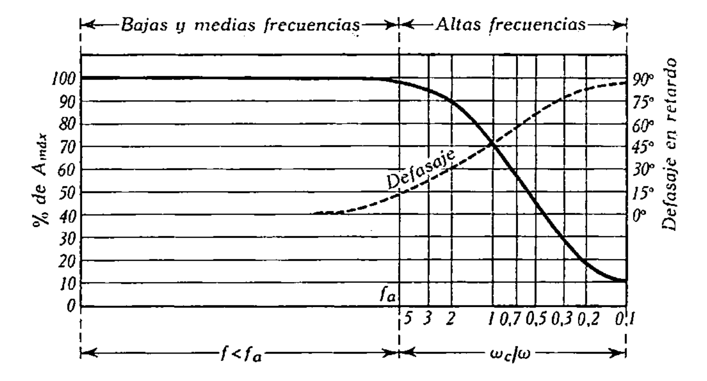


FIG. 300 bis

a) El tipo de acoplamiento *directo a resistencias* impropiamente llamado a corriente continua, se utiliza cuando se precisa amplificar frecuencias muy bajas, y en él se utilizan únicamente resistencias según muestra la figura 300; su amplificación desciende en las altas frecuencias, cuando empiezan a intervenir las capacidades parásitas de los conductores y la de cátodo rejilla de la 2.ª válvula, y su uso se limita casi exclusivamente a los sistemas reductores de ruido en el registro de sonido, densitómetros fotoeléctricos y circuitos de indicadores de volumen (2). El circuito equivalente se ve en la figura 300 bis. Sus mayores inconvenientes son, el precisar una tensión de alimentación para el ánodo muy superior a otros tipos de acoplamiento, y que una desviación de la impedancia de cualquier vál-

(1) Véase también nuestro trabajo *Equipos de baja frecuencia*, en preparación.
(2) Véase nuestro *Curso de cine sonoro (II Registro)*.

vula del amplificador modifica la salida del último paso. Para las bajas y medias frecuencias se puede suponer C_g (en el que están en-



f_a representa la frecuencia a la que los efectos de C_g comienzan a entrar en juego

FIG. 301. Respuesta en frecuencia de un acoplo directo a resistencia

globadas todas las capacidades parásitas) nulo, y la figura 301 da la respuesta del amplificador, ya que la relación entre la amplificación entre las altas frecuencias y las bajas o medias está dada por:

$$\left|\frac{A_{af}}{A_{máx}}\right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{X_g}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 C_g^2 \omega^2}} \quad \text{con } R = \frac{R_i R_c}{R_i + R_c}$$

Llamaremos *frecuencia de corte* a la f_c, para la que $R = \dfrac{1}{C_g \omega_c}$, o sea $f_c = \dfrac{1}{2\pi R C_g}$; para ella la amplificación puede reducirse a $A_{af} = \dfrac{A_{máx.}}{\sqrt{2}} = 0{,}70\ A_{máx.}$, o sea, en $20 \cdot \log \dfrac{1}{\sqrt{2}} = -3$ dB por debajo de $A_{máx}$. Obsérvese que el denominador de la expresión anterior es idéntico al que obtuvimos al estudiar la influencia de la capacidad interna de una fotocélula, salvo los valores de las constantes que intervienen en él, y, efectivamente, la respuesta es semejante a la figura que allí obtuvimos.

b) Acoplamiento resistencia-capacidad. Es tan conocido, que casi huelga toda descripción; su variante respecto al anterior es la inserción de un condensador de bloqueo de la tensión de ánodo de la primera válvula, y una resistencia de pérdida o fuga, en la rejilla de la segunda (fig. 302). El circuito equivalente, puesto que se trata de un pentodo, será más indicado a intensidad constante, como se muestra en la misma figura.

1) Frecuencias medias. Las capacidades parásitas de placa-cátodo de la primera válvula y rejilla-cátodo de la segunda tienen muy poca

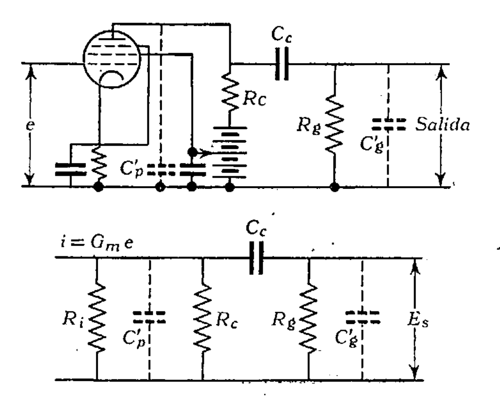


FIG. 302. Acoplo resistencia capacidad y circuito equivalente

influencia y puede prescindirse de ellas, de modo que, aplicando nuestro criterio de la válvula virtual equivalente (véase Capítulo XIII), se tendrá:

$$u_p = -e\mu_m \quad \text{con } \mu_m = \mu \frac{Z_m}{R_i + Z_m} \quad \text{y } Z_m = \frac{R_c R_g}{R_c + R_g}$$

y, por tanto, el factor de amplificación generalizado, que en este caso expresa la relación de tensiones o amplificación, valdrá

$$A_m = \mu_m = \frac{\mu}{R_i} \cdot \frac{R_i Z_m}{R_i + Z_m} = G_m \frac{R_i Z_m}{R_i + Z_m}$$

siendo ésta la amplificación máxima, ya que la influencia de las capacidades es reducir la respuesta.

2) Altas frecuencias. Para ellas, la capacidad C_g, cuya impedancia llamaremos $X_g = 1/C_g \omega$, tiene ya influencia aun cuando su valor sea pequeño, y debe tomarse en cuenta; el condensador de bloqueo no tiene, en cambio, influencia, ya que se encuentra en serie, y la carga de ánodo es ahora la compuesta de R_c, R_g y X_g en paralelo; llamando Z_a a esta carga combinada y teniendo en cuenta el valor de Z_m antes encontrado, el factor de amplificación virtual será ahora:

$$\mu_a = G_m \frac{R_i Z_a}{R_i + Z_a} \quad \text{con } Z_a = \frac{Z_m X_g}{Z_m + X_g}$$

Llamando ahora R a la impedancia combinada de los tres en paralelo R_i, R_c y R_g y dividiendo este valor de μ_a por el obtenido en las frecuencias medias, tendremos la relación entre la amplificación en altas

frecuencias y la máxima en las medias, es decir:

$$\frac{A_{af}}{A_{máx}} = \frac{\mu_a}{\mu_m} = \frac{1}{1 + \dfrac{R}{X_g}} \quad \text{con} \ \frac{1}{R} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_g}$$

y cuyo módulo valdrá

$$\left|\frac{\mu_a}{\mu_m}\right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{R}{X_g}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 C_g^2 \omega^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{\omega}{\omega_c}\right)^2}}$$

expresión idéntica, como era de esperar, a la obtenida en amplificación directa a resistencias *a)*, salvo los valores de las constantes; hay, pues, aquí también una *frecuencia de corte* $f_c = \dfrac{1}{2\pi RC_g}$, para la cual la amplificación cae 3 dB, es decir:

$$A_{af} = A_{máx}/\sqrt{2} = 0{,}707 \cdot A_{máx}$$

3) Bajas frecuencias. Ahora es el efecto del condensador de bloqueo el que toma acción creciente a medida que decrece la frecuencia, mientras que apenas ejerce influencia la capacidad en paralelo, y prescindiremos de ella; en paralelo con R_c se encuentran como carga de ánodo las impedancias en serie X_c y R_g, por lo que la impedancia de carga es ahora:

$$Z_c = \frac{R_c (X_c + R_g)}{R_c + R_g + X_c} \quad \text{con} \ X_c = \frac{1}{\omega C_c}$$

y, por consiguiente, el factor de amplificación virtual

$$\mu' = G_m \frac{R_i Z_c}{R_i + Z_c}$$

pero obsérvese que la tensión que aplicamos a la segunda rejilla es la que se deriva de R_g, y esta resistencia juntamente con X_c actúan ahora como potenciómetro para la tensión de salida de la válvula virtual, por lo que la tensión de salida que recibe la rejilla de la segunda válvula valdrá

$$\mu e \cdot \frac{R_g}{R_g + X_g} \quad (e = \text{tensión de entrada aplicada a la 1.ª rejilla})$$

y la amplificación verdadera de acoplo será, en este caso,

$$\mu_b = G_m \frac{R_i Z_c}{R_i + Z_c} \cdot \frac{R_g}{R_g + X_g}$$

de modo que la relación entre la amplificación en baja frecuencia A_{bf} y la amplificación máxima $A_{máx}$ vale

$$\frac{A_{bf}}{A_{máx}} = \frac{\mu_b}{\mu_m} = \frac{R_i Z_c}{R_i + Z_c} \cdot \frac{R_g}{R_g + X_g} \cdot \frac{R_i + Z_m}{R_i \cdot Z_m}$$

[el valor Z_m, sacado de 1)]

la cual, mediante sencillas transformaciones, se llega a poner en la forma:

$$\frac{A_{bf}}{A_{máx}} = \frac{\mu_b}{\mu_m} = \frac{1}{1 + \frac{X_c}{R'}} \quad \text{con } R' = R_g + \frac{R_i R_e}{R_i + R_c}$$

cuyo módulo valdrá

$$\left|\frac{\mu_b}{\mu_m}\right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_c}{R'}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1/R'^2 C_c^2 \omega^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega'_c/\omega)^2}}$$

y la frecuencia de corte en bajas frecuencias vale ahora $f_c' = \frac{1}{2\pi R' C_c}$. Para ella, como siempre, la amplificación desciende 3 dB, es decir, $A_b = A_{máx.}/\sqrt{2} = 0{,}707 \times A_{máx}$.

Obsérvese también ahora la identidad de esta expresión con la que hemos encontrado al hacer el estudio de la respuesta de los amplificadores previos, salvo, como siempre, los valores de las constantes que en ella intervienen.

Curva universal. La figura 303 nos da la correspondiente al caso de acoplo resistencia capacidad, de igual modo que la figura 301 nos dió la de acoplo a resistencia directa, y ambas permiten la determinación de la respuesta de cualquier amplificador con acoplo de la forma respectiva, y que sólo varíen por sus constantes o cuyas constantes se conoce; la tabla siguiente de Terman es un auxiliar poderoso para el manejo de tales curvas:

Amplificación relativa en acoplo resistencia-capacidad

Bajas frecuencias		Altas frecuencias	
Frecuencias	$A_{bf}/A_{máx}$	Frecuencia	$A_{af}/A_{máx}$
5 f_c'	0,980	0,2 f_c	0,980
2 f_c'	0,895	0,5 f_c	0,895
f_c'	0,707	f_c	0,707
0,5 f_c'	0,447	2 f_c	0,447
0,2 f_c'	0,196	5 f_c	0,196
0,1 f_c'	0,100	10 f_c	0,100

f_c y f_c' son respectivamente las frecuencias de corte que antes hemos determinado para las altas y bajas frecuencias respectivamente.

Para manejar la curva universal en conexión con esta tabla, se procederá de la siguiente manera: 1.°, se calcula la amplificación en las frecuencias medias mediante la expresión que dimos en 1); 2.°, se calcula X_c/R' dado en 3), para varias frecuencias, o, lo que es a menudo

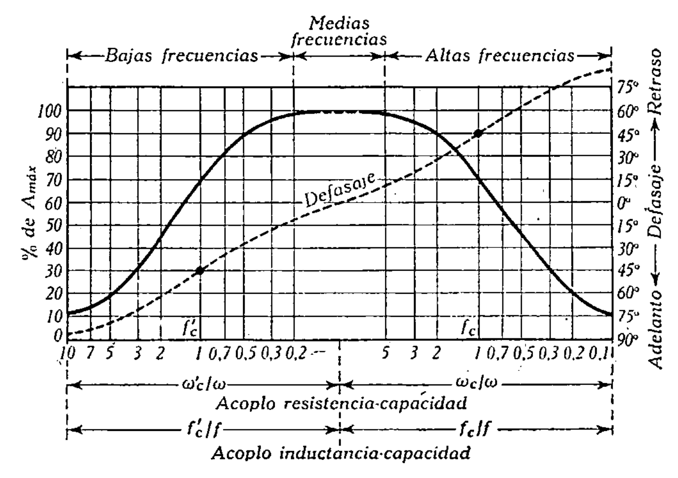


Fig. 303. Respuesta de acoplo R-C y L-C: ambas curvas son idénticas, aunque varíen de un tipo a otro, según los constantes de cada caso

más conveniente, se determinan las frecuencias que dan a esa fracción los valores tabulados en el cuadro anterior, y después se utiliza la curva universal o la tabla para determinar la caída en amplificación para las bajas frecuencias, y 3.°, se estima la capacidad total C_g y se calcula para varias altas frecuencias la fracción R/X_g tal como se definió en 2), o, lo que es a menudo más conveniente, se calculan las frecuencias a las que R/X_g toma los valores tabulados en el cuadro anterior y, finalmente, se determina la respuesta en altas frecuencias mediante la curva universal, o con la tabla.

Veamos un ejemplo: Sea una válvula para la que $R_i = 5$ megohmios, G_m vale 414 micromhos, $R_p = 0,5$ megohmios, $C_c = 0,005 \mu_f$, $R_g = 0,5$ megohmios y, finalmente, C_g se estima en 70 pf.

Primeramente determinamos $Z_a = 238000$, y de aquí $A_{máx} = 98,4$. Ahora, para las bajas frecuencias, la de corte vale $f'c = 33,4$ ciclos, y en la tabla encontramos que a las frecuencias 66,8 — 16,7 — 6,7 ciclos (que son, respectivamente, 2, 0,5 y 0,2 veces 33,4 ciclos), la amplificación relativa es 0,895 — 0,447 y 0,196 de 98,4, es decir, 88,1 — 43,9 y 19,3, respectivamente.

Para las altas frecuencias, determinamos también la frecuencia de corte $fc = 9560$ ciclos, y mediante la tabla o la curva encontramos que, a las frecuencias 4780 — 19120 y 47800 ciclos, la amplificación relativa es 0,895, 0,447 y 0,196, y la real es los productos de estos números por 98,4, es decir, 88,1 — 43,9 y 19,3, respectivamente. Acontece muchas veces, que la caída de amplificación se da en decibelios en lugar de en la forma de cociente de tensiones que hemos dado y que hay en la curva universal, pero entonces la figura 273 que dimos en el Capítulo XIV nos permitirá pasar de una forma a la otra.

Después de todo lo dicho, se ve que tanto en el acoplo directo a resistencia como en el de resistencia-capacidad, la amplificación depende del factor μ de la válvula y de las relaciones entre las resistencias en el circuito, y que a medida que se aumenta $R_p = R_c$ aumenta la amplificación. Pero un aumento en esta resistencia origina una mayor caída de tensión procedente del manantial de alta, y, por consiguiente, para mantener la misma tensión en placa habrá que elevar la tensión del manantial de alimentación de placa, lo que reduce la eficiencia de la válvula. En la figura 304 *a*, se ve cómo varía la amplificación con la resistencia R_p; para la válvula del caso, la amplificación crece rápidamente hasta aproximadamente los 60 000 Ω, y más allá de ese valor un aumento no tiene apenas efecto. Se ve también que la amplificación alcanza el 90 % del valor de μ cuando $R_p = 10\ R_i$, y tanto en este tipo como en el acoplo a impedancia que indicamos a continuación, se considera aceptable un valor de la amplificación entre un 70 y un 80 % de μ. Cuando se utilizan pentodos, al aumentar la resistencia R_p de acoplamiento se precisa un cambio en las tensiones de rejilla de mando y rejilla-pantalla, pues en otro caso se formaría el cátodo virtual a que aludimos al hablar de los pentodos, y la válvula trabajaría en condiciones anormales.

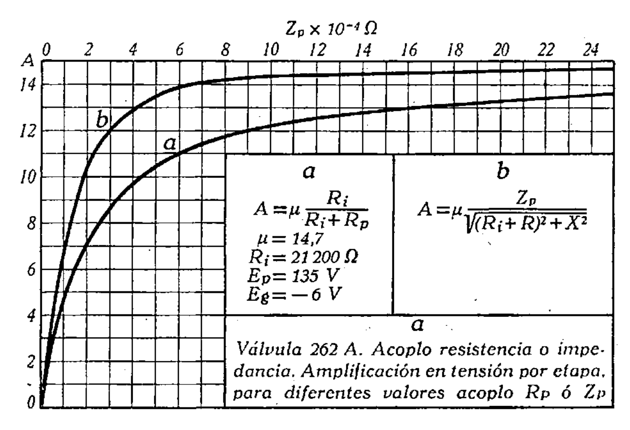
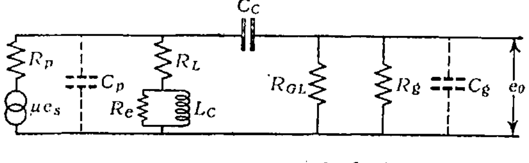


Fig. 304. *a*, variación de A con R_p (Acop. resistencia); *b*, variación de A con Z_p (Acop. impedancia)



Circuito exacto equivalente

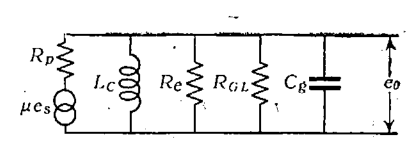


Fig. 305. Circuito práctico equivalente de acoplo impedancia-condensador

Finalmente, digamos que la RCA ha dado un cuadro muy completo de condiciones prácticas de trabajo de todas las válvulas adecuadas a este tipo de trabajo de su fabricación. En él se limita la respuesta por la parte inferior del espectro para una frecuencia a la que

la amplificación referida a los 420 c/s cae a 0,8, es decir, unos 2 dB por debajo del valor para los 420 c/s, indicando, además, los valores de la frecuencia alta para la que empieza a caer la respuesta, según los valores de R_p.

c) Acoplo inductancia-capacidad. Hemos desarrollado el procedimiento de la válvula virtual para que se vea la posibilidad de llegar fácilmente a los mismos resultados que se obtienen por el teorema de Thevenin y del circuito equivalente. En el acoplo por impedancia, que consiste en reemplazar en *b)* la resistencia R_c por una inductancia o bobina de choque, podríamos seguir cualquiera de los dos procedimientos, pero como los resultados van a ser semejantes, nos limitamos a dar el circuito equivalente (fig. 305) y las conclusiones finales, el llegar a las cuales puede ser un ejercicio útil al lector. Si se llama r_p a la resistencia en corriente continua del choque y R_e a una resistencia equivalente a las pérdidas por histeresis y corriente de Foucault en el núcleo de la bobina, tendremos:

1) Frecuencias medias. Tiene el mismo valor que en el caso anterior *b)*, pero reemplazando R_c por R_e; por iguales razones, la amplificación es $A_{\text{máx}}$.

2) Bajas frecuencias. Si ponemos $X_L = L\omega$ y $\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_g}$ se tiene, como allí,

$$\left|\frac{A_{\text{bf}}}{A_{\text{máx}}}\right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (R'/X_L)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c'}{\omega}\right)^2}}$$

en la última de las cuales la frecuencia de corte está definida por $R' = L\omega_c'$, o sea, $f_c' = \frac{R'}{2\pi L}$, y, como antes, es aquélla para la que la amplificación respecto a las frecuencias medias se reduce en 3 dB.

3) Altas frecuencias. Poniendo $X_g = 1/C_g\,\omega$ y tomando el mismo valor para R' que en 2), se tiene:

$$\left|\frac{A_{\text{af}}}{A_{\text{máx}}}\right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R'}{X_g}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}}$$

estando ahora la frecuencia de corte definidap or la condición $R' = X_g$, o sea, $f_c = \frac{1}{2\pi R' C_g}$, que da la misma reducción de amplificación de siempre.

Las últimas expresiones de 2) y 3) muestran que la curva universal correspondiente a este tipo de acoplo es idéntica a la obtenida en *b)*, si bien varían por los valores de las constantes. (fig. 303)

La figura 304 *b*, es la equivalente para la misma válvula de la figura 304 *a*, y muestra un crecimiento mucho más rápido para valores crecientes de la impedancia, de tal modo que el 90 % del valor de μ que toma la amplificación se alcanza ya para una impedancia del choque igual a dos veces la resistencia interior de la válvula. Como quiera que la impedancia de la bobina decrece con la frecuencia, también decrecerá la amplificación por esta causa más rápidamente que en las altas; la figura 306, en cierto modo inversa de la figura 254, muestra la influencia del valor de la inductancia de la bobina, y enseña que para obtener la amplificación máxima o, lo que es lo mismo, una respuesta horizontal hasta los 50 c/s, se precisa una inductancia de 400 henrios, y que si la misma fuese sólo de 10 henrios la amplificación empezaría a caer ya a los 2000 c/s.

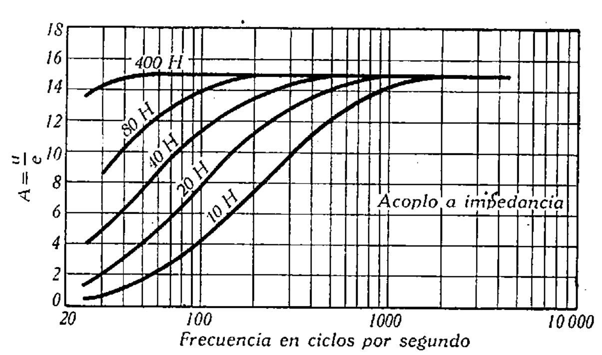


FIG. 306. Respuestas de amplificación para la válvula 262 A con $R_i = 21\,200\ \Omega$; $\mu = 14{,}7$; $E_p = 135$ voltios; $E_g = -6$ voltios

La ventaja sobre el acoplo a resistencias reside en la pequeña caída de tensión en corriente continua que se produce en la inductancia, necesitando, por tanto, un manantial de alimentación de placa de menor tensión que en el acoplo a resistencias; esta ventaja es de poco interés si tal alimentación se hace con rectificación de corriente alterna y no compensa el gasto inicial de construcción, muy superior al del acoplo según *b)*.

Observación. Hemos puesto especial cuidado en poner de manifiesto las frecuencias de corte, por la utilidad que presentan para el uso de las curvas universales; mediante ellas es posible referir estas curvas a las frecuencias, en lugar de hacerlo a las relaciones que aparecen en las figuras, y si, como también hemos indicado ya, tomamos sobre el eje vertical una escala de decibelios con el cero en la amplificación en las frecuencias medias, tendremos la curva universal que expresa las pérdidas en decibelios en función de las frecuencias, la cual es mucho más corriente en la práctica. Basta observar en la escala horizontal (fig. 303) que los valores en ella escritos (0,7-0,2, 0,5-0,2, 0,1-1-2-3-5-7-...) no son otra cosa, después de definidas las frecuencias de corte, que los valores de $\frac{\omega}{\omega_c} = \frac{f}{f_c}$ o de $\frac{\omega_c'}{\omega} = \frac{f_c'}{f}$, de tal modo que una vez calculado el valor numérico de f_c o de f_c', esos puntos corresponden a frecuencias $0{,}7f_c$-$0{,}2f_c$-$0{,}7f_c$..., f_c-$2f_c$-$3f_c$-$5f_c$..., y otro tanto puede decirse para f_c'. Cuando se han de manejar muchas veces y para distintas f_c y f_c', es más rápido y práctico representar sobre el mismo papel loga-

rítmico que se ha utilizado en la construcción de la curva, una escala absoluta de frecuencias, y entonces, una vez conocidas las frecuencias de corte, se superponen las dos escalas de modo que la escala de frecuencias tenga la frecuencia de corte coincidiendo con $\frac{\omega}{\omega_c} = \frac{f}{f_c} = 1$; todos los puntos antes indicados tienen ahora enfrente su respectiva frecuencia.

Otra observación importante es que, para esas frecuencias de corte, el defasaje entre la tensión de entrada y la de salida es precisamente 45° en adelanto o retraso respecto a las frecuencias medias para las cuales es nulo, puesto que en aquéllas la tangente del ángulo de defasaje, por la definición de las mismas, vale $\pm$ 1; ello permite trazar sensiblemente, como se ha hecho, la curva de defasaje, y todo ello es válido para las correspondientes curvas de los amplificadores previos.

d) Acoplamiento en tensión por transformador. El papel del transformador es ahora acoplar el circuito de placa de la primera válvula, al circuito de rejilla de la segunda, y desde el punto de vista de la cadena de transmisión que forma cualquier sistema sonoro, representa un buen sistema de acoplo, ya que siendo, en general, muy distintas las impedancias de aquellos circuitos, el transformador es un buen medio de equilibrar tales impedancias, evitando toda pérdida que se originaría por conexión directa; debe, pues, estar diseñado de modo que trabaje en una impedancia de entrada igual a la del circuito de placa de la primera válvula, que generalmente se reduce a la resistencia interior de la misma, y el secundario con una igual a la del circuito de rejilla de la segunda válvula (¹). De aquí se deduce la conveniencia de elegir válvulas con valores medios para μ y R_i, pues una impedancia de entrada muy grande no sería fácil de equilibrar con la del primario del transformador, y es ésta la razón por la que este tipo de acoplamiento se emplea casi exclusivamente con tríodos, presentando la ventaja que indicamos a su tiempo al hablar del acoplo a impedancia, en lo que se refiere a su menor resistencia a la corriente continua del manantial de alimentación de ánodo. En cuanto al secundario, se presenta esta misma ventaja, y las limitaciones de ganancia que se originan por los efectos de capacidad en altas frecuencias a causa de la alta impedancia del circuito de rejilla, son semejantes a las encontradas en el estudio de la capacidad propia de la fotocélula.

Se adapta muy bien este sistema de acoplamiento para la excitación de válvulas de potencia en contrafase, pero tiene el inconveniente, respecto al acoplo a resistencias, de su mayor precio de coste y de que deben estar muy bien blindadas para no captar perturbaciones e influencias de campos magnéticos parásitos. También puede emplearse este acoplo con pentodos, pero dada su alta resistencia interior, es con-

---

(¹) Esta última no determina o limita, no obstante, la impedancia del secundario.

veniente conectar una resistencia de valor adecuado en el primario y en paralelo a fin de reducir la impedancia de entrada sobre la que trabaja el transformador.

El estudio elemental de este tipo de acoplamiento, de suyo difícil, se simplifica notablemente, reemplazándolo por un circuito equivalente con transformador de relación uno, es decir, con tensión de salida igual a la verdadera dividida por la relación de vueltas, del secundario al primario n_2/n_1. Este circuito equivalente se simplifica todavía más,

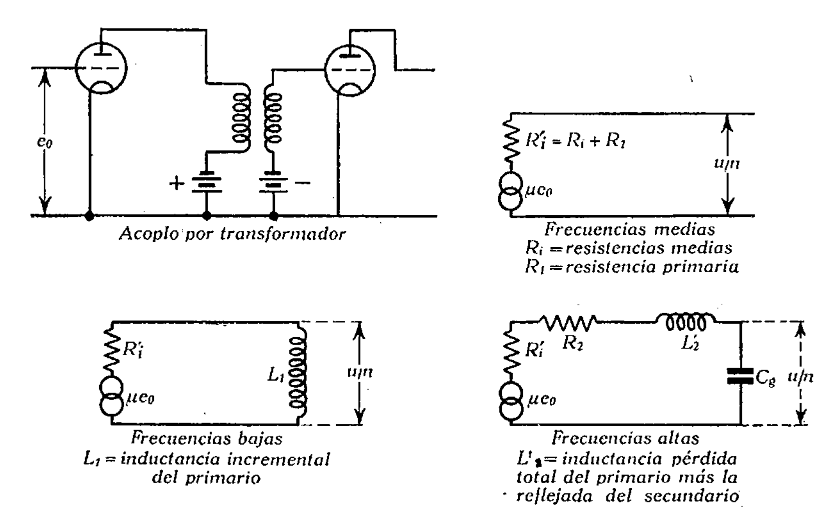


FIG. 307. Acoplo por transformación y circuitos equivalentes

fraccionando, como hicimos hasta ahora, la gama de frecuencias en tres secciones (fig. 307).

1. Frecuencias medias. La resistencia e inductancia del primario, así como la resistencia del secundario, reflejada en el primario y la capacidad reducida que hemos designado por C_g, son tan pequeñas que no tienen influencia y el circuito actúa como si estuviese abierto; otro tanto sucede con la resistencia equivalente a las pérdidas en el hierro. La amplificación en esta gama será, pues:

$$\frac{u}{n} = \mu e \qquad » \qquad A_m = \frac{u}{e} = \mu n$$

2. Bajas frecuencias. Ahora son los mismos términos que antes, salvo la inductancia del primario, los que pueden despreciarse en los cálculos; el circuito se simplifica como indica la figura 307 y de él se deduce fácilmente:

$$\frac{u}{n} = \mu e \frac{X_L}{R_1 + R_i + X_L} \qquad \text{con } X_L = jL\omega \qquad \text{y } j = \sqrt{-1}$$

y de aquí el módulo de la amplificación:

$$|A_{bf}| = \left|\frac{u}{e}\right| = \frac{\mu n}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_1 + R_i}{L_1 \omega}\right)^2}} = \frac{A_m}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}}$$

en cuya segunda expresión interviene, como siempre, una frecuencia de corte $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{R_1 + R_i}{2\pi L_1}$ y para la cual la amplificación referida a la que se obtuvo para las frecuencias medias vale $A_{bf} = Am/\sqrt{2} = 0{,}707 \cdot A_m$. Resulta, pues, que la respuesta en *bajas* desciende por efecto de la inductancia del primario, como en el caso del acoplo a impedancia, y tanto más cuanto menor sea el valor de ésta, siendo instructiva para su influencia la figura 306 que dimos entonces; no debe olvidarse, en el caso actual, que por estar formado el núcleo de material magnético, y estar recorrido el primario por corriente continua procedente del generador, la inductancia varía con la corriente continua que circula por el devanado y que, de no evitar la saturación, puede ser origen de deformaciones en la reproducción.

3. Altas frecuencias. La inductancia del primario tiene todavía menos influencia que en las frecuencias medias, pero, en cambio, adquiere cada vez más preponderancia a medida que crece f, la capacidad reducida en paralelo y la inductancia de pérdida o de dispersión, por lo que ambas deben ser tomadas en cuenta y el circuito se reduce al de la figura 307; llamando R a la suma $R_i + R_1 + R_2$, se obtiene de la figura:

$$\frac{u}{n} = \mu e \frac{X_c}{R + X_L - X_c} \qquad \text{con} \quad \left.\begin{aligned} X_c &= \frac{1}{j C_g \omega} \\ X_L &= j L'_2 \omega \end{aligned}\right\} \quad \text{y } j = \sqrt{-1}$$

el módulo de la amplificación en *altas* valdrá

$$|A_{af}| = \left|\frac{u}{e}\right| = \frac{\mu n}{\sqrt{R^2 C_g^2 \omega^2 + (L'_2 C_g \omega^2 - 1)^2}}$$

pero L'_2 y C_g forman ahora un circuito resonante, cuya frecuencia *propia o normal* f_r, viene definida por:

$$C_g L_2' \omega_r^2 - 1 = o, \quad \text{de donde} \quad C_g \omega_r = \frac{1}{L_2' \omega_r}$$

$$\text{y } f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2' C_g}}$$

para esa frecuencia de resonancia, las tensiones a través de la bobina y del condensador se encuentran en oposición de fase, y en cuadra

tura con respecto a la que circula por R; hay, como se dice, una sobretensión, cuyo valor depende como es sabido del Q de la bobina definido por la relación $Q = \frac{L_2' \omega}{R}$ y para la resonancia $Q_r = \frac{L_2' \omega_r}{R}$. mediante la introducción de este factor en la expresión última de la amplificación A_{af}, ésta toma la forma

$$|A_{af}| = \frac{\mu n}{\sqrt{\frac{R^2}{L_2'^2 \omega_r^2} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_r^2} - 1\right)^2}}$$

la que poniendo para más sencillez $\frac{\omega}{\omega_r} = \frac{f}{f_r} = \gamma$, se transforma en:

$$|A_{af}| = \frac{A_m}{\sqrt{\frac{1}{Q_r^2}\left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_r^2} - 1\right)^2}} = \frac{A_m}{\sqrt{\frac{\gamma^2}{Q_r^2} + (\gamma^2 - 1)^2}}$$

esta expresión para la frecuencia de resonancia adquiere el valor

$$|A_{af}|_r = Q_r A_m = \mu n \cdot Q_r$$

En definitiva, la respuesta del acoplo en las *altas*, varía con el valor del Q y, cualquiera que sea éste, hay una cresta para la frecuencia de resonancia, tanto más elevada cuanto mayor sea el valor de Q_r; esta frecuencia de resonancia viene a desempeñar aquí un papel, en cierto modo, semejante a la frecuencia de corte superior en los otros tipos de acoplo. La figura 307 *a* muestra la curva universal para este caso y distintos valores de Q_r; cuando $Q_r \simeq 0{,}75$, la respuesta es sensiblemente semejante a las obtenidas en los casos anteriores *b)* y *c)*, y para valores superiores la amplificación en las *altas* llega a exceder a la amplificación en las *medias*. Esto quiere decir que, para un transformador particular, hay un valor preciso de la R_i, que es el más adecuado; si la resistencia de la válvula es inferior a él, la respuesta en las bajas frecuencias será mejor, pero habrá una cresta muy sensible en las *altas*; si, por el contrario, R_i es mucho mayor que ese valor óptimo, ambas respuestas en altas y bajas serán afectadas en sentido perjudicial; en la práctica, se ha encontrado que la mayoría de los transformadores comerciales trabajan en buenas condiciones con tríodos de i_a entre 2 y 8 mA y R_i entre 8000 a 15 000 Ω, y para los que el μ oscila entre 8 y 20, con lo que la corriente es insuficiente para provocar una saturación en el hierro y la carga del primario es la adecuada para dar una buena respuesta en las *bajas*.

Con referencia al transformador, su inductancia del primario debe ser suficientemente alta para que la respuesta en las bajas no sea muy pendiente, la inductancia de dispersión, suficientemente pequeña para

que la frecuencia de resonancia sea muy elevada; por otra parte, el material magnético que forma el núcleo debe ser de buena calidad, con entrehierro suficiente para que la corriente continua de ánodo no origine nunca la saturación, pero no tan excesivo que reduzca la inductancia incremental del primario. Todos los transformadores para esta clase de acoplos son elevadores, de relación entre 2 y 4, y con el fin de reducir la inductancia de dispersión, suelen llevar los devanados

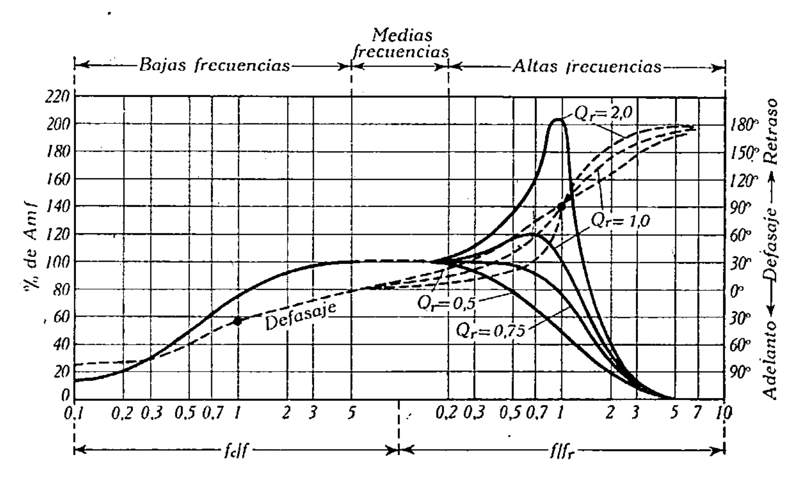


FIG. 307 *a.* Respuestas del acoplo por transformador, para distintos valores de Q_r.

convenientemente fraccionados y alternados, de modo que el incremento de capacidad distribuída que se origina por esta disposición no resulte perjudicial.

Como ya hemos indicado antes, muchas veces se colocan resistencias de valor adecuado en paralelo con el primario o con el secundario, con el fin de modificar la respuesta del amplificador; una resistencia en el primario de valor r tiene por efecto, para la válvula, reducir el valor de μ, según vimos al hablar de la válvula virtual, al valor $\frac{\mu R_i}{r + R_i}$; y para el transformador reducir la impedancia de entrada sobre la que trabaja del valor R_i, al valor $\frac{R_i r}{R_i + r}$, que es la combinada de las dos; de este modo se reduce la amplificación, mejorando la respuesta en las *bajas*, pero se eleva la cresta de resonancia. Cuando la resistencia se inserta en el secundario, con un valor adecuado, se reduce también la amplificación, y la cresta de la resonancia, si bien también viene afectada, aunque en menor proporción, la respuesta en las bajas frecuencias; por ello se suele emplear este sistema para eliminar o atenuar aquella cresta. Esto mismo nos da la manera más práctica de utilizar este acoplamiento con pentodos de gran R_i, pues es

suficiente intercalar en el primario una resistencia en paralelo r tal, que la combinada de ambas quede reducida al valor práctico que tendría para un tríodo adecuado a este acoplo.

Amplificación en potencia

Como ya dijimos antes, el *paso de potencia o final*, como también se le llama, tiene por misión entregar a la impedancia de carga la mayor potencia posible; esta impedancia de carga es, en nuestro caso particular, la línea o líneas de altavoces cargadas en el otro extremo con las bobinas de sonido de los mismos cuando, como es el caso clásico, no hay intercalada ninguna red divisora de frecuencias; pues, en tal caso, la carga lo constituye la impedancia de entrada de dicha red. En la práctica, esta carga se reduce a una resistencia pura R_L, lo que de otra parte nos simplifica notablemente el problema.

En tal caso, la potencia útil recogida en la carga se calcula fácilmente a partir de las dos ecuaciones de la válvula que nos dan la corriente de ánodo y la tensión en la carga, y valdrá

$$W_u = \frac{i_p}{\sqrt{2}} \cdot \frac{u_p}{\sqrt{2}} = \frac{\mu^2 e^2 R_L}{2 (R_L + R_i)^2}$$

la que, como se ve, varía con el valor de dicha carga y con los parámetros de la válvula; si se nos impone la válvula, así como las condiciones en que debe trabajar (tensiones de electrodos fijadas y excitación e dada), entonces se muestra fácilmente que tal potencia adquiere su valor máximo precisamente cuando la resistencia de carga R_L se hace igual a la resistencia interior R_i de la válvula, y este valor es

$$W_{\text{máx}} = \frac{\mu^2 e^2}{8 R_i}$$

cuando, por el contrario, no se fija la tensión de excitación y sólo nos interesa obtener con una válvula dada la máxima potencia útil, entonces se llega a la conclusión de que $R_L = 2R_i$, y su valor ahora es

$$W_u = \frac{\mu^2 e^2}{9 R_i}$$

Debemos observar, no obstante, que todas estas expresiones han sido establecidas a partir de los valores de i_p y u_p, los cuales, como hicimos notar a su tiempo, suponen las características de las válvulas totalmente rectas, sin limitación alguna y sensiblemente paralelas en toda su longitud, cosa que dista mucho de ser exacta y, por tanto, que impondrá ciertas limitaciones a las oscilaciones de las magnitudes,

como tensión y corriente de placa y tensión de excitación de rejilla, a fin de mantenerse en regiones de las características en las que sensiblemente se conserva esa linearidad; de otra parte, se imponen esas mismas limitaciones para evitar que la deformación que se origina por tales causas, y la suplementaria por corriente en rejilla que en algún caso puede existir, no exceda de valores tolerables previamente fijados; las expresiones encontradas antes no se hallan sometidas a ninguna de esas limitaciones, y de aquí que sólo pueden tomarse como topes o límites máximos, pero las conclusiones relativas a la carga subsisten con gran aproximación la primera, y para la segunda se suelen tomar valores que oscilan entre 1,5 y 3,5 del valor de R_i; de este modo, si bien decrece la potencia recogida en la carga, también decrece notablemente la deformación, cosa muy importante en nuestro caso.

Para llegar a estas conclusiones, se hace preciso estudiar y determinar la potencia sin deformación de un modo gráfico sobre las propias características de las válvulas, buscando la carga más favorable; pero ello encuentra un lugar más adecuado de desarrollo en las obras dedicadas al estudio especial de la amplificación, por lo que nos limitamos a estas indicaciones.

Se comprende, pues, que el tipo de válvula más apto para la amplificación en potencia difiere en sus características del más apropiado para la amplificación en tensión; en efecto, la eficiencia o rendimiento de una válvula en potencia (es decir, la relación entre la potencia útil sin deformación y la suministrada a la placa por la tensión y corriente de placa en reposo, o sea, en su punto de funcionamiento sin excitación) depende solamente de la relación entre la carga R_L y la resistencia de placa R_i, y, por consiguiente, la potencia útil sin deformación de la válvula será aproximadamente proporcional a la potencia en placa; esto nos quiere decir que una válvula capaz de suministrar gran potencia debe trabajar con gran tensión en placa o con gran corriente en placa.

En las válvulas de pequeña potencia, tales como las utilizadas en radiorreceptores, en las que la tensión de placa está limitada a 250 ó 300 V, no puede obtenerse una gran potencia de salida más que aumentando la corriente de placa; esto exige una gran emisión de cátodo y un factor de amplificación suficientemente bajo para que esa pequeña tensión de ánodo produzca en las proximidades del cátodo un campo electrostático bastante intenso para producir esa corriente elevada. En tales condiciones, la carga de ánodo R_L suele ser aproximadamente el doble de R_i, y si μ es pequeño, como suele ser el caso, se necesita una gran tensión de excitación e y, por tanto, una gran polarización de rejilla para obtener la máxima potencia que es capaz de proporcionar la válvula. Ello constituye el precio que se paga por la pequeña tensión de placa, para lograr toda la potencia posible.

En las válvulas de gran potencia, como las que trabajan a 500 V o más, el factor que limita la potencia útil es ahora la disipación de ener-

gía en placa bajo la forma de calor. En tales válvulas, la polarización de rejilla se fija por la corriente tolerable en placa, y la carga R_L suele ser superior al doble de R_i. El resultado es una mayor eficiencia en placa que para los de baja tensión, y una menor tensión de excitación e, puesto que alta tensión en placa y baja corriente determinan un mayor μ. La carga suele ser considerablemente más grande que la resistencia interior.

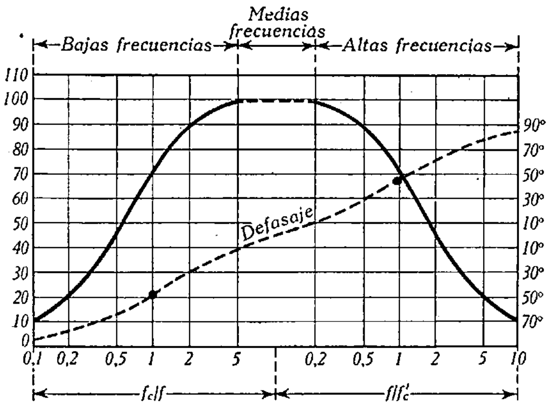


Fig. 307 *b*. Curva universal de la respuesta del paso de potencia con acoplo por transformador de la carga R_L

Acoplamiento del paso de potencia a la carga mediante transformador. Podría hacerse este acoplo mediante resistencias intercaladas en el circuito de placa de las válvulas finales; pero este sistema no es recomendable por dos razones: de un lado, tal procedimiento supone una gran pérdida de energía en esas resistencias, de las cuales sacaríamos la tensión necesaria para excitar o mover los altavoces; de otra parte, las elevadas tensiones de placa nos exigirían una excelente calidad en el aislamiento de la línea, lo que supone un aumento de precio y muchas precauciones en el manejo de la misma y receptores, a menos de tener el equipo desconectado, cosa incómoda, ya que es frecuente manipular con el equipo dispuesto para el trabajo; por estas y otras razones, entre las cuales podremos citar la flexibilidad del transformador para acoplar impedancias, es éste el sistema usual de conectar la línea al amplificador de potencia. Las impedancias sobre las cuales debe trabajar este transformador son, de una parte, la R_i de la válvula final, y, de otra parte, la línea o líneas de altavoces con una carga en su extremo igual a la de la bobina móvil del mismo, y que en buena aproximación se pueden suponer resistivas y de valor R_L.

El estudio de este acoplo se hace como siempre descomponiendo la gama de frecuencias a reproducir en tres secciones y reemplazando el sistema válvula-transformador-carga por el circuito equivalente, de un modo totalmente semejante a como lo hemos hecho en los casos anteriores. Existen, no obstante, aquí, en relación con el caso del transformador de interetapas en tensión antes estudiado, dos diferencias esenciales: en primer lugar, y al menos en lo que a equipos reproductores de sonido se refiere, casi siempre la carga es muy pequeña frente a la R_i y, por tanto, suelen ser de tipo reductor; de otra parte, la capacidad reducida que producía allí la cresta de resonancia en altas fre-

cuencias en conjunción con la inductancia de pérdida, no existe apreciablemente, ya que el principal sumando que contribuye en aquella capacidad, la capacidad rejilla-filamento de la segunda válvula, no existe aquí; podría tener influencia y aparecer este término si la capacidad distribuída de la línea de altavoces fuese excesivamente larga; pero éste tampoco es el caso normal de los equipos de reproducción de que nos ocupamos, en los que las líneas son suficientemente cortas para poder prescindir de tal influencia.

El análisis en las tres secciones de la gama de frecuencias conduce a los resultados siguientes:

1. Frecuencias medias. La amplificación vale:

$$|A_m| = \frac{\mu\, n\, R_L}{R_L' + R_p'} \quad \text{con} \begin{cases} R_L' = n^2 (R_L + R_2) \\ R_p' = R_i + R_L \\ n = \dfrac{n_1}{n_2} \\ R_1 \text{ y } R_2 \text{ resistencias de } 1^{\text{rio}} \text{ y } 2^{\text{rio}} \end{cases}$$

2. Bajas frecuencias. Se produce una caída de amplificación motivada por la intervención de la inductancia del primario; aquélla viene dada por:

$$|A_{bf}| = \frac{A_m}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{R}{X_L}\right)^2}} = \frac{A_m}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \quad \text{con} \begin{cases} R = \dfrac{R_L' R_p'}{R_L' + R_p'} \\ X_L = j\, L_p \omega \\ L_p = \text{inductancia del } 1^{\text{rio}} \end{cases}$$

como es fácil de comprobar, la frecuencia de corte vale

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{R}{2\pi\, L_p}$$

Para ella, el defasaje en adelanto es de 45° como siempre. Resulta, pues, que para que la caída en amplificación sea lenta a medida que decrece la frecuencia, convendrá mantener la inductancia del primario suficientemente alta; una buena práctica de tipo empírico consiste en mantener a los 50 c/s una $X_1 = 2n^2 R_L$ en la que L_1 esté expresada en henrios y R_L en ohmios.

3. Altas frecuencias. Ahora es la inductancia de dispersión del primario, más la de dispersión del secundario reflejada en el primario, quienes provocan el descenso de amplificación y, por ello, según vemos a continuación, conviene mantenerlas reducidas al mínimum posible; el valor de la amplificación es:

$$|A_{af}| = \frac{A_m}{\sqrt{1 + (X'/R')^2}} = \frac{A_m}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c')^2}} \quad \text{con} \begin{cases} X_L' = j\,\omega\,(L_1 + n^2 L_2) \\ R' = R_p' + R_L' \end{cases}$$

la frecuencia de corte en esta región es $f_c' = \dfrac{\omega_c'}{2\pi} = \dfrac{R'}{2\pi L'}$ con un retraso de fase de 45°.

Para una carga dada y un valor fijo de la R_i de la válvula, la relación entre las dos frecuencias de corte viene dada por:

$$\frac{f_c'}{f_c} = \frac{R'}{2\pi L'} \times \frac{2\pi L_p}{R} = \frac{L_p}{L'} \times \frac{(R_L' + R_p')^2}{R_L' \ R_p'}$$

la cual, como se ve, depende solamente de la relación de la inductancia de pérdida a la inductancia del primario; a su inversa se le llama *factor de pérdida o dispersión* y cuanto menor sea, mayor será la gama de frecuencias reproducibles con una fidelidad en amplitud de menos de 3 dB con relación a la amplificación a las frecuencias medias. De otra parte, para un valor fijo de R_i, es decir, una válvula dada, y un transformador también dado, un aumento en la carga R_L da lugar a menor pendiente en las altas frecuencias, si bien se pierde algo en las *bajas*. Finalmente, n se elige de modo que la carga reflejada en el primario $n^2 R_L$ sea igual a la carga de trabajo especificada por el fabricante de la válvula; si esta carga es precisamente R_i, habrá equilibrio de impedancias, y, por tanto, no habrá ninguna pérdida de inserción; pero si, como es lo usual, y en vista de la menor deformación, es distinta, como hemos dicho antes, e igual o algo superior a 2 R_i, entonces hay un desequilibrio de impedancias, el cual, como veremos a su tiempo, puede ser corregido mediante realimentación negativa [1].

En ambos casos se supone $R_1 = R_2 = 0$, lo que no es totalmente exacto, originándose por esta causa pérdidas en el cobre, que unidas a las del hierro determina una eficiencia en el transformador que no debe ser inferior al 75 u 80 %. La figura 307 *b* da la curva universal de respuesta en frecuencias para este tipo de acoplamiento.

(1) Para más detalles, véase GIL SANTIAGO, *Realimentación negativa y características compuestas*, 1946.

XVI. Igualadores y atenuadores

Igualadores o correctores de respuestas en frecuencia

Es imposible estudiar todos los tipos de igualadores, porque se pueden concebir infinitos; sin embargo, algunos tipos sencillos son de tan gran empleo que conviene mencionarlos aquí. Cuando la respuesta a las frecuencias de un circuito no es uniforme, es decir, horizontal, y por deformación en frecuencia u otra causa se desea obtener un tipo determinado de respuesta $R_d(f)$, distinta de la real en tal circuito, que llamaremos $R_a(f)$, es evidente que restando de la respuesta actual la respuesta deseada, obtendremos la respuesta del igualador:

$$R_a(f) - R_d(f) = R_i(f);$$

para determinar esta respuesta y el tipo de igualador adecuado, bastará, pues, trazar en papel semilogarítmico la respuesta actual del circuito, y después, en otro papel semilogarítmico transparente de igual escala, trazar una curva cuyas ordenadas, para cada ω o cada f, sean la diferencia entre la ordenada del equipo para esa frecuencia y la deseada; la curva así obtenida es precisamente $R_i(f)$, respuesta del igualador. Bastaría ahora buscar, entre todas las respuestas de igualadores conocidos, cuál es la que mejor se adapta a ésta o permanece paralela (1) a ella en toda la gama de frecuencias que deseamos modificar, para obtener el tipo de igualador que deberíamos adoptar. Esto hace ver fácilmente que sólo será posible prácticamente en casos muy limitados, pues sólo de un número limitado de respuestas de igualadores se suele disponer, y en tales casos veremos prácticamente como es muy fácil determinar las constantes de los mismos. En realidad, muchos igualadores son repetición de otros con constan-

(1) Si permanece paralela, un desplazamiento paralelo al eje en decibelios puede hacerlas coincidir, y este desplazamiento mide una atenuación o ganancia en toda f, antes o después de la igualación.

tes distintas. La forma de la respuesta requerida es determinada y puede ser controlada, pues, por el diseño del igualador; en el caso de cine sonoro, la banda de frecuencias sobre la cual se extienden esas respuestas alcanza desde 40 a 8000 c/s, y un cambio en las amplitudes relativas de las distintas frecuencias tiene una gran influencia en el sonido reproducido por el equipo, tal como lo escucha el oído. Por ejemplo, cuando las frecuencias altas son más atenuadas que las res-

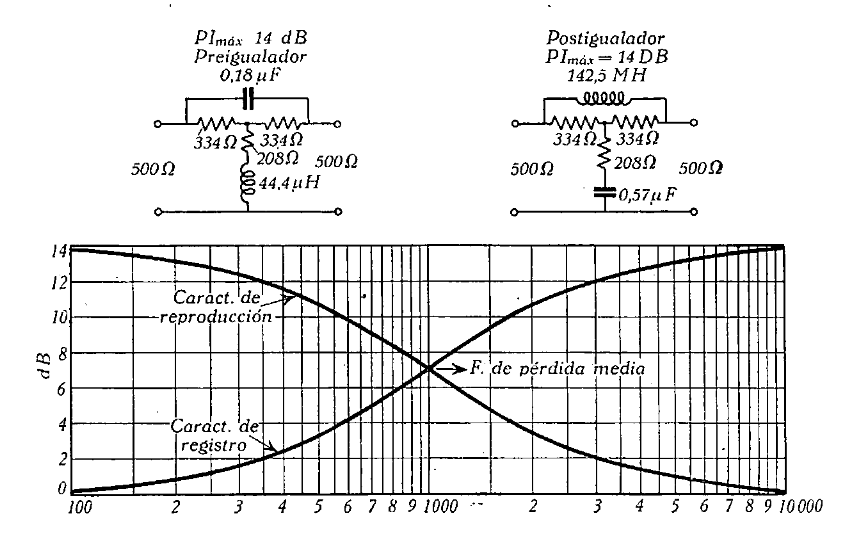


FIG. 308. Circuitos igualadores empleados en registro complementario

tantes, es decir, de menor respuesta, el sonido aparece *opaco*, mientras que si son de mayor amplitud o, como se dice, acentuadas, entonces el sonido resulta *brillante*.

Los igualadores pueden ser *variables*, al objeto de modificar su característica de pérdida de inserción o *fijos;* los variables se utilizan a menudo en los sistemas de re-registro, mientras que los fijos se utilizan en registro y reproducción del sonido. La necesidad de igualación variable se comprende fácilmente, si se tiene en cuenta que las condiciones artificiosas del ambiente en el que se registra al sonido de una escena no permiten, en algunos casos, obtener las características acústicas deseables en las escenas reales tomadas como parte de una imagen continua; en re-registro, en cambio, se puede alterar, mediante el uso de igualadores variables, las relaciones de amplitud de las frecuencias componentes del sonido, de tal modo que produzcan la ilusión requerida por la imagen, cosa posible con tales cambios de amplitud.

Prescindiendo de este caso de re-registro, lo normal es mantener las relaciones de amplitud de las componentes del sonido, y si, por cualquier causa, es inevitable una deformación en frecuencia en alguna

parte del sistema de transmisión, el único medio de corregir tal deformación es el empleo de igualadores con respuesta recíproca de tal deformación.

En otros casos, la deformación se produce deliberadamente en una parte del equipo, para después compensarla en otra parte con un igualador de respuesta inversa (fig. 308), con lo que se logran ventajas en la transmisión disminuyendo la carga del equipo para determinadas frecuencias, como sucede en el registro por el sistema llamado *complementario*, del que nos ocuparemos en otro lugar.

Tipos generales de igualadores

En todos vamos a suponer que las impedancias de emisión y de carga entre las cuales debe insertarse el igualador, son puramente resistivas, y, como siempre, las llamaremos R_g y R_L cuando sean distintas, y cuando sean iguales las llamaremos R_o, como dijimos al tratar de los dipolos inversos. El primer caso es más difícil, en general, y tanto en el uno como en el otro, los igualadores pueden estar constituídos por un dipolo más o menos complejo o por un cuadripolo de constitución especial; cuando están constituídos por un solo dipolo, se llaman *tipo serie* o *tipo paralelo*, según que el tal dipolo esté intercalado en serie o en paralelo en el circuito de transmisión; a menos que sean verdaderos atenuadores, sus impedancias de entrada y salida Z_{12} y Z_{34} varían con la frecuencia y, por tanto, no conservan el equilibrio de impedancias, ni aun cuando las dos impedancias entre las que se insertan sean iguales a R_o.

Cuando se trata de un cuadripolo, los más corrientes son: el tipo *serie completo*, o *paralelo completo*, que llevan dos impedancias, una en serie Z_1 y otra en paralelo Z_2, estando Z_1 delante de Z_2 con respecto a la dirección de transmisión en los primeros; los segundos, en cambio, llevan intercalada Z_2 delante de Z_1. Finalmente, más complicados que éstos y también formados por un cuadripolo están los *tipo T*, formados por tres dipolos conectados en estrella, los *tipo T en puente*, semejantes al anterior, pero con una impedancia en paralelo con los dos brazos de la T, lo que hace este cuadripolo equivalente, en cierto modo, a un puente y los *tipos en celosía*, que son los más complejos, de los que nos ocuparemos en un caso especial; estos tres últimos tipos aunque más complicados presentan la ventaja de conservar constante sus impedancias Z_{12} y Z_{34} e igual a R_o, en condiciones definidas, por lo que presentan determinado interés.

En todos ellos interesa conocer, de un lado, las pérdidas de inserción, es decir, la respuesta del atenuador a las distintas frecuencias, y de otro los valores de Z_{12} y Z_{34}, estando ambas determinadas para cada tipo de igualador por sus constantes y las impedancias entre las cuales se inserta.

Según que los elementos de cada dipolo o cuadripolo sean más o menos complejos, resultan variados tipos de respuesta a las pérdidas de inserción, y sólo de los más sencillos nos ocuparemos aquí, y siempre el procedimiento consistirá en determinar el valor de la corriente en la carga, antes y después de la inserción; naturalmente, cuando no conservan el equilibrio de impedancias habrá, según hemos dicho

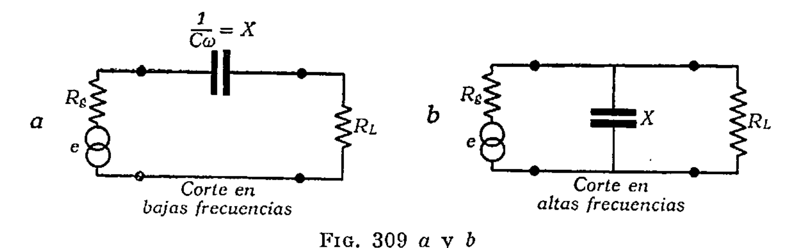


FIG. 309 *a* y *b*

antes, otras pérdidas por reflexión y de interacción en el circuito de que aquí no vamos a tratar.

EJERCICIO. Determinar las P. I. en decibelios de una $L = 1{,}64$ mH en serie entre $R_0 = 1000\ \Omega$ para 50 y 1000 c/s (éstos son las frecuencias límites de la banda usual en registro).

Dipolos de un solo elemento reactivo con cargas distintas. El caso práctico más útil se refiere a un condensador en tipo serie o paralelo simple, puesto que, es fácil encontrar siempre a mano en el comercio un condensador que reúna las condiciones precisas.

Tipo serie. Llamando $R = R_g + R_L$ y con las notaciones de la figura 309 *a*, la corriente en la carga R_L, antes de la inserción, vale:

$$I = \frac{e}{R_g + R_L} \quad \text{y después } I' = \frac{e}{R_g + R_L + X}$$

y si llamamos X_0 a la reactancia que iguala en valor a R y que corresponde a una *frecuencia de corte* f_0, se obtiene, para las pérdidas de inserción (poniendo de manifiesto el signo),

$$P\,I = -\,20 \log \frac{I'}{I} = -\,10 \log \frac{R^2}{R^2 + X^2} = -\,10 \log \frac{1}{1 + \frac{X^2}{R^2}} =$$

$$= +\,10 \log \left(1 + \frac{f_0^2}{f^2}\right)$$

como se ve, este tipo de igualación nos lo hemos encontrado ya en el amplificador con acoplo resistencia-capacidad, y allí expresaba, como aquí, la caída en las bajas frecuencias, motivada por la influencia del condensador de bloqueo respecto a las frecuencias medias; la frecuen-

cia de corte produce, según allí vimos, una atenuación o pérdida de 3 dB, y en la figura 310 esta f_o vale 100 c/s. El valor del condensador que nos da una pérdida de 3 dB a una frecuencia cualquiera requerida, se obtiene de las relaciones:

$$X_o = R; \quad \frac{1}{C\omega} = R; \quad C = \frac{1}{2\pi Rf}$$

y expresando C en μf,

$$C_{\mu f} = \frac{10^6}{6{,}28\,Rf} = \frac{160\,000}{(R_g + R_L)\,f}$$

esta fórmula nos permite calcular el condensador cuando nos den las dos resistencias y la frecuencia a que se quiere la pérdida de 3 dB, y si se quiere obtener dibujada la respuesta, basta desplazar una hoja de papel con las mismas escalas que aquellas en las que está dibujada la curva de la figura 310 hasta que la frecuencia a la que se quiere el corte coincida con los 100 c/s de dicha figura; y si el papel es transparente, dibujar la curva de esa figura, calcándola sobre el nuevo papel. Cuando se requiera una pérdida doble, es decir, de 6 dB, bastará insertar dos condensadores como el anterior y en la misma forma, pero en partes *aisladas* del circuito, porque si no ambos se combinan para dar una reactancia $2X$ que no produce la pérdida de 6 dB, sino 7 dB.

Las impedancias Z_{12} y Z_{34} varían con la frecuencia; si $R_g = R_L = R_o$, ambas valen:

$$Z = R_o\left(1 + j\,2\,\frac{f_o}{f}\right)$$

Tipo paralelo (fig. 309 *b*). Siguiendo un método semejante al anterior, para las pérdidas de inserción y frecuencia de corte se tiene:

$$P\,I = -10\log\frac{(f_o'/f)^2}{1 + (f_o'/f)^2} = -10\log\frac{1}{1 + (f/f_o')^2} =$$

$$= 10\log\left[1 + (f/f_o')^2\right], \text{ donde: } X_o' = R' = \frac{R_g\,R_L}{R_g + R_L}$$

y el valor del condensador en μf, para que el corte se efectúe a la frecuencia f, valdrá

$$C_{\mu f} = \frac{160\,000}{f \cdot R'}$$

Esta característica de pérdidas de inserción también la hemos encon-

trado en el acoplo resistencia-capacidad, pero para las altas frecuencias.

Obsérvese que la expresión obtenida en este caso para las pérdidas de inserción es idéntica a la obtenida con el condensador en serie, salvo que se debe poner aquí f/f_o' en lugar de f_o/f; por consiguiente, la característica, en este caso, se obtendrá, para el mismo valor de f_o, mediante una simetría respecto a la vertical que pasa por f_o, y esto nos muestra ya que las pérdidas aumentan en las altas frecuencias. Cuando,

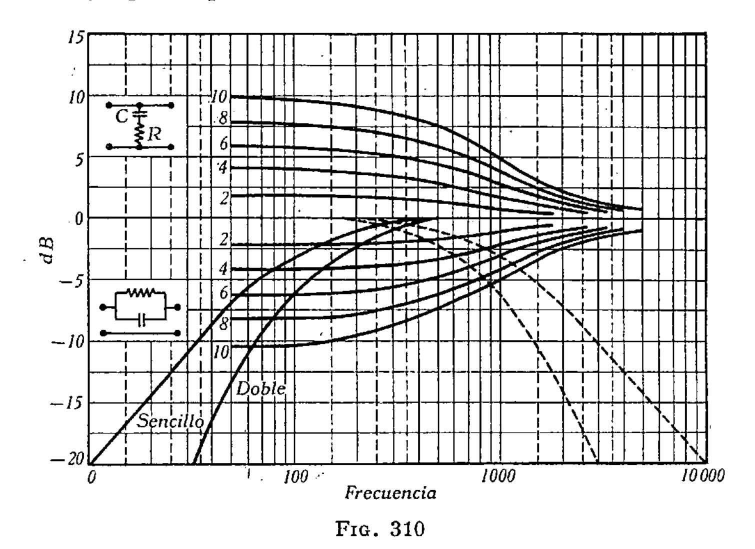


Fig. 310

como es el caso f_o, cambia, la curva se obtiene mediante una simetría y un desplazamiento hasta la nueva frecuencia de corte f_o', que es distinta en razón de los distintos valores de R y R'; en la figura 310, esta frecuencia f_o' es 1000 c/s.

Tampoco aquí hay equilibrio de impedancias; es decir, Z_{12} y Z_{34} cambian con la frecuencia. Calcúlese como ejercicio para $R_g = R_i = R_o$. También, como en el caso anterior, se puede obtener una pérdida de 6 dB a la frecuencia de corte f_o' intercalando en paralelo dos condensadores iguales, en dos partes del circuito de transmisión *aisladas*, con el fin de que no se compongan ambos condensadores para dar uno de capacidad doble, y se puede obtener la respuesta de pérdidas de inserción mediante una escala logarítmica transparente, como antes, para llevarla a la frecuencia f_o' deseada.

Tipo serie simple, con dipolo complejo. Dentro de esta estructura y cuando las impedancias entre que se inserta son distintas, tiene relativa importancia el constituído por una resistencia en paralelo con un condensador; si estuviesen en serie, el resultado sería un atenuador serie y un igualador serie simple, como el estudiado antes, como es fácil comprobar.

Los valores de las corrientes antes y después de la inserción valen, respectivamente:

$$I_L = \frac{e}{R_g + R_L}, \quad I_L' = \frac{e}{R_g + R_L + j\dfrac{RX}{R + jX}} =$$

$$= \frac{e\,(R + jX)}{(R_L + R_g)\,R + jX\,(R_L + R_g + R)}$$

y poniendo $R = k\,(R_g + R_L)$, se obtiene, para las pérdidas de inserción:

$$P\,I = -20 \log \left| \frac{1}{1 + \dfrac{jkRX}{R + jX}} \right|^2 = -20 \log \frac{R^2 + X^2}{R^2 + (k+1)^2 X^2} =$$

$$= 20 \log \frac{1 + \left(\dfrac{R}{X}\right)^2}{(k+1)^2 + \left(\dfrac{R}{X}\right)^2}$$

Examinemos los valores que toma esta expresión, para la reactancia nula e infinita del condensador y para X_o, elegida de modo que las pérdidas de inserción se reduzcan a la mitad de su valor máximo $+ 10 \log (1 + k)$:

Para $X = 0$; $P\,I = 10 \log 1 = 0$

Para $X = \infty$; $P\,I_{\text{máx}} = -10 \log \dfrac{1}{(k+1)^2} = +20 \log (1 + k)$

Para $X_o = \dfrac{R}{\sqrt{1 + k}}$; $P\,I = +10 \log (1 + k)$

de esta última expresión se determina la frecuencia f_m para la que las pérdidas se reducen *a la mitad*, y, con ello, la respuesta a las pérdidas de inserción será:

$$P\,I = -10 \log \frac{1 + \left(\dfrac{R}{X_o} \cdot \dfrac{X_o}{X}\right)^2}{(1 + k)^2 + \left(\dfrac{R}{X_o} \cdot \dfrac{X_o}{X}\right)^2} =$$

$$= -10 \log \frac{1 + (1 + k)\,(f/f_m)^2}{(1 + k)^2 + (1 + k)\,(f/f_m)^2} =$$

$$= +10 \log (1 + k) - 10 \log \frac{1 + (k + 1)\,(f/f_m)^2}{(1 + k) + (f/f_m)^2}$$

y representada ésta en papel semilogarítmico (fig. 310), podremos utilizarla con la misma finalidad que lo hicimos en los casos anteriores, llevando la frecuencia f_m a coincidir con la que dé en el papel semilogarítmico transparente una pérdida sensiblemente igual a la mitad de la requerida; entonces conocemos k, R y f_m y podremos determinar de la expresión de f_m el valor del condensador. Los dos parámetros, pues, que caracterizan un igualador dentro de este tipo, son la pérdida máxima y la frecuencia de pérdida media.

Cuando se debe utilizar a menudo este tipo de igualador, pero entre cargas distintas de una a otra vez, y para diversas frecuencias medias y distintas pérdidas de inserción máximas, se pueden construir ábacos en papel logarítmico doble sin más que tener en cuenta que, de la expresión hallada para el condensador, se tiene:

$$2\pi C f_m = \frac{\sqrt{1+k}}{R}, \quad C = \frac{\sqrt{k+1}}{2\pi f_m k (R_g + R_L)}$$

y expresando C en microfaradios,

$$10^6 C = C_{\mu f} = \frac{10^3}{2\pi}\sqrt{\frac{k+1}{k^2}} \cdot \frac{1}{f_m} \cdot \frac{1000}{R_g + R_L} = \frac{1000\,A}{R_g + R_L}, \quad (\alpha)$$

en la que se ha llamado A al valor $A = 160\sqrt{\frac{k+1}{k^2}} \cdot \frac{1}{f_m}$, y tomando logaritmos en esta última expresión de A,

$$\log A = \log 160\sqrt{\frac{k+1}{k^2}} - \log f_m$$

esta ecuación representa una recta para cada valor de k; es decir, para una pérdida de inserción máxima característica de cada igualador, cuyo coeficiente angular es -1, con tal de dibujarla en papel logarítmico doble; podremos, pues, trazar una serie de rectas paralelas en ese papel, para pérdidas máximas, por ejemplo: de 2,4, ... 18,20 dB, determinando de la expresión de las pérdidas máximas el valor del parámetro k, que lo inscribiremos sobre cada recta, y tomando en un eje los valores de A y en el otro las frecuencias f_m. De este modo, dada que sea la máxima pérdida de inserción que se desea obtener y la f_m, así como las dos resistencias R_g y R_L, de aquellas pérdidas de inserción máximas sacaremos en la recta correspondiente el valor de k y con este valor y los de las dos resistencias calcularemos fácilmente R; después, sobre la misma recta y con el valor de f_m determinamos fácilmente el valor de A y con la expresión (α) calculamos fácilmente el valor del condensador $C_{\mu f}$.

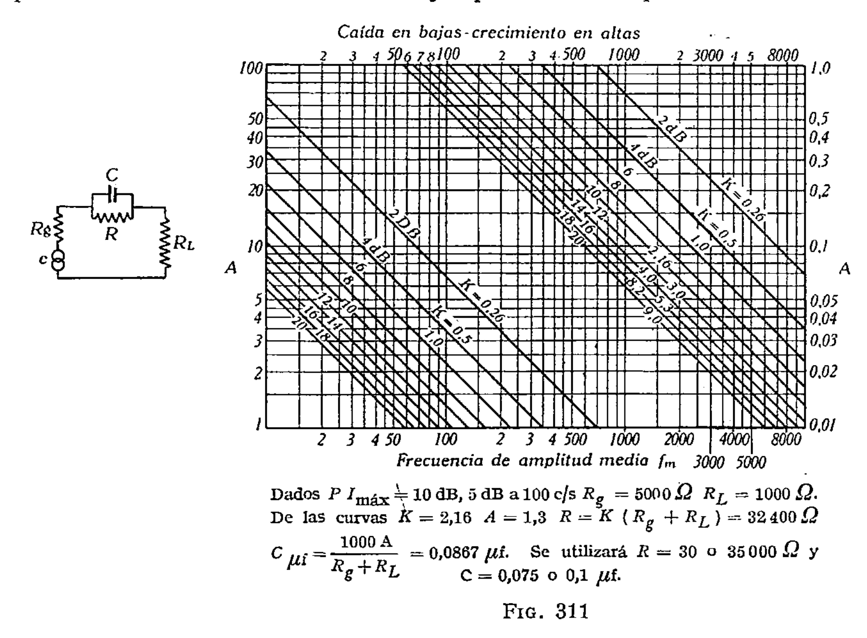
Obsérvese que en la ecuación de una de esas rectas, si se divide A por un factor N, la ordenada en el origen de la recta, o sea el factor

que contiene k, no varía con tal de multiplicar la misma frecuencia f_m por el mismo factor, ya que

$$\log \frac{A}{N} = \log 160 \sqrt{\frac{1+k}{k^2}} - \log N f_m$$

con ello se pueden trazar dos rectas para cada valor de k, una para las altas frecuencias y otra para las bajas (fig. 311).

Tampoco aquí se conservan las impedancias Z_{12} y Z_{34} constantes para las distintas frecuencias ni hay equilibrio de impedancias.



Dados $P\,I_{\text{máx}} = 10$ dB, 5 dB a 100 c/s $R_g = 5000\,\Omega$ $R_L = 1000\,\Omega$.
De las curvas $K = 2{,}16$ $A = 1{,}3$ $R = K\,(R_g + R_L) = 32\,400\,\Omega$

$C\,\mu f = \frac{1000\,A}{R_g + R_L} = 0{,}0867\,\mu f$. Se utilizará $R = 30$ o $35\,000\,\Omega$ y $C = 0{,}075$ o $0{,}1\,\mu f$.

FIG. 311

Tipo paralelo simple con dipolo resistencia-capacidad. Como antes, la resistencia R y el condensador C han de estar en serie, porque si estuviesen en paralelo, podríamos reemplazar el igualador por un atenuador simple en paralelo, seguido de un igualador paralelo simple del tipo antes estudiado. Llamando $R_o' = \frac{R_L\,R_g}{R_L + R_g}$, y $R = k\,R_o'$, la expresión de las corrientes antes y después de la inserción será:

$$I_L = \frac{e}{R_g + R_L}, \quad I_L' = \frac{e}{R_g + \dfrac{R_L\,(R + jX)}{R + R_L + jX}} \cdot \frac{R + jX}{R + R_L + jX} =$$

$$= \frac{e\,(R + j\,X)}{R\,(R_g + R_L) + R_g\,R_L + jX\,(R_g + R_L)}$$

de donde las pérdidas de inserción valdrán:

$$-20 \log \frac{I'_L}{I_L} = -10 \log \frac{R^2 + X^2}{(R + R'_o)^2 + X^2} =$$

$$= -10 \log \frac{k^2 R'^2_0 + X^2}{R_o'^2 (1 + k)^2 + X^2}$$

Consideremos, como antes, los valores que toma esta expresión para X nulo e infinito, y para que las pérdidas de inserción se reduzcan a la mitad del máximo, lo que nos determina la frecuencia media f_m:

Para:

$X = 0$ $\quad P\,I_{\text{máx}} = -10 \log \frac{k^2}{(k+1)^2} = +20 \log \frac{k+1}{k}$

$X = \infty$ $\quad P\,I = 10 \log 1 = 0$

$X_o = R'_o \sqrt{k(k+1)}$ $\quad P\,I = -10 \log \frac{k}{k+1} = 10 \log \frac{k+1}{k}$

con ello, las pérdidas de inserción se pueden escribir:

$$P\,I = -10 \log \frac{\frac{k}{k+1} + (f_m/f)^2}{\frac{k+1}{k} + (f_m/f)^2} =$$

$$= 10 \log \frac{k+1}{k} - 10 \log \frac{k + (k+1)\,(f_m/f)^2}{(k+1) + k\,(f_m/f)^2}$$

el valor del condensador, para una pérdida de inserción máxima determinada por el valor de k, que corresponde a una pérdida media a la frecuencia f, viene determinado ahora por la expresión:

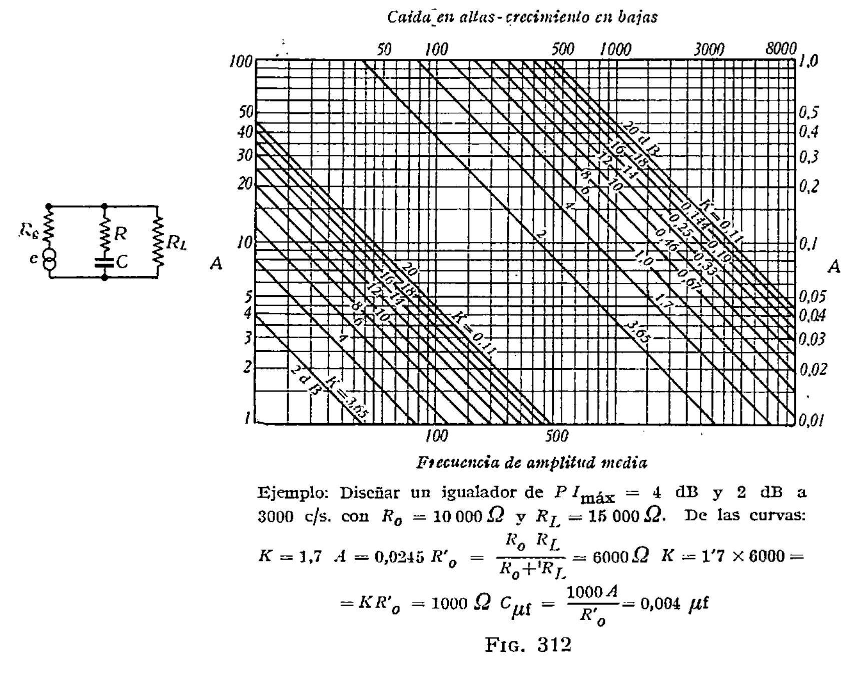
$$\frac{1}{C\,\omega} = R'_o \sqrt{k\,(k+1)} = R \sqrt{\frac{k+1}{k}}$$

$$C = \frac{1}{2\pi\, f\, R'_o} \sqrt{(k+1)\,k}; \qquad C_{\mu f} = \frac{10^2}{2\pi} \sqrt{k\,(k+1)} \cdot \frac{1000}{R'_o f}$$

y llamando A al factor $\frac{160 \sqrt{k\,(k+1)}}{f}\ \frac{I^r}{f}$ se tiene $C_{\mu f} = \frac{1000\,A}{R'_o}$

esta última expresión y la de R_o' nos determinan los valores de la

resistencia R y de $C_{\mu f}$ en función de los dos parámetros k y A, que, como antes, se pueden representar por dos familias de rectas en papel logarítmico doble, en las que el parámetro de cada elemento de la familia, cada recta, es la máxima pérdida de inserción en decibelios,



Ejemplo: Diseñar un igualador de $P\,I_{\text{máx}} = 4$ dB y 2 dB a 3000 c/s. con $R_o = 10\,000\,\Omega$ y $R_L = 15\,000\,\Omega$. De las curvas:

$$K = 1{,}7 \quad A = 0{,}0245 \quad R'_o = \frac{R_o\,R_L}{R_o + R_L} = 6000\,\Omega \quad K = 1'7 \times 6000 =$$

$$= K R'_o = 1000\,\Omega \quad C_{\mu f} = \frac{1000\,A}{R'_o} = 0{,}004\ \mu f$$

Fig. 312

o el correspondiente valor de k (fig. 312); en efecto, tomando log en la expresión de A:

$$\log A = \log \frac{160}{\sqrt{k(k+1)}} - \log f_m$$

Tampoco en este caso se conservan constantes con la frecuencia Z_{12} ni Z_{34}. Observando la figura 310, se ve que con respecto a f_m el tipo serie representa descenso en las frecuencias más bajas y un crecimiento en las frecuencias más altas que f_m, mientras que el tipo paralelo representa un crecimiento de amplitud en las bajas y un descenso en las altas frecuencias, respecto a f_m. En la figura 310 se ha representado las características para una frecuencia de amplitud media $f_m =$ 1000 c/s.

Caso de impedancias resistivas iguales. Este caso es particularmente importante cuando su valor es R_o y tal que las dos impedancias serie Z_1 y paralelo Z_2 son inversas respecto a R_o, o, como vimos antes, cumplen la condición

$$Z_1 \times Z_2 = R_o^2;$$

en este grupo caben todos los tipos cuya clasificación dimos antes,

y basta examinar cualquier caso concreto para ver que en todos ellos las pérdidas de inserción vienen expresadas siempre por:

$$P\ I = 20 \cdot \log \frac{R_o + Z_1}{R_o} = 20 \log \frac{R_o + Z_2}{Z_2}$$

Obsérvese que el tipo paralelo completo es tal que la malla conectada a los terminales 1 y 2 es la inversa de la conectada a los mismos en el tipo serie completo, y que el tipo en T se puede descomponer en un tipo serie completo, y un tipo paralelo completo, tal como se muestra en la figura 313; entonces, si las impedancias Z_{34} del primero y Z_{12} del segundo son iguales, como es el caso con los valores de la figura para cada elemento, las pérdidas de inserción serán la suma de las de ambos, y, por tanto, deducible a partir de las de aquéllos.

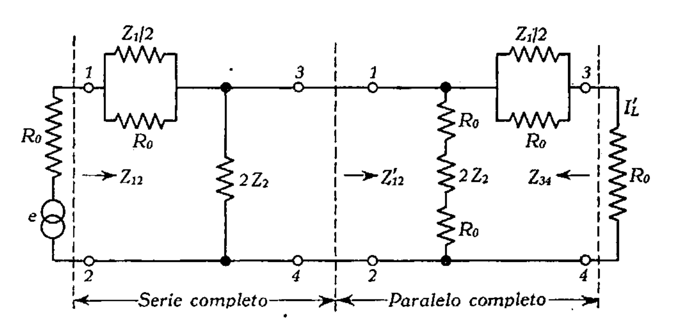


FIG. 313. Circuito equivalente de un igualador en T

El **tipo T en puente** merece un estudio aparte en el caso actual de ser Z_1 y Z_2 impedancias inversas respecto a R_o figura 314. En la figura 314 bis se ve que, prescindiendo de la R_o correspondiente a la segunda rama de la T, este igualador es equivalente a un tipo paralelo completo, en el cual la tensión E_{BC} vale:

$$E_{BC} = Z_1\, I_{AB} - R_o\, I_{AC},$$

pero $$I_{AB} = \frac{E}{2\,(R_o + R_1)}; \quad I_{AC} = \frac{E}{2\,(R_o + Z_2)};$$

$$E_{BC} = \frac{E}{2}\left[\frac{Z_1\, Z_2 - R_o^2}{(Z_1 + R_o)\,(Z_2 + R_o)}\right] = 0,$$ por ser Z_1 y Z_2 inversas respecto a R_o.

En definitiva, entre los puntos B y C se puede insertar cualquier resistencia sin alterar el equilibrio de la malla, y, por tanto, las pérdidas de inserción serán las mismas que las del tipo paralelo completo, y, por ser simétrico deberá ser $Z_{34} = Z_{12} = R_o$.

El **tipo celosía** más usual (fig. 315) merece también un estudio similar al anterior, y, para ello, consideremos el circuito en puente de la figura 315 bis, en la que $Z_A \cdot Z_B = R_o^2$; de la consideración de las

mallas 1-3-4-1 y 1-3-2-1, a las cuales se aplica la ley de Kirchoff, se llega fácilmente a establecer:

$$I_o = I_A + I_B = \frac{E}{R_o}\left[\frac{R_o}{R_o + Z_A} + \frac{Z_A}{R_o + Z_A}\right] = \frac{E}{R_o}$$

$$I_A - I_B = \frac{E}{R_o} \times \frac{R_o - Z_A}{R_o + Z_A} = I_o \times \frac{R_o - Z_A}{R_o + Z_A}$$

la primera nos muestra que la impedancia combinada entre los terminales 1-2 es R_o, mientras que la segunda nos enseña que la corriente que circula en la diagonal R_o del puente es precisamente la que entra en los terminales 1-2, multiplicada por el factor $\frac{R_o - Z_A}{R_o + Z_A}$.

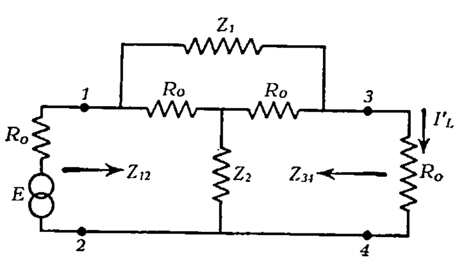


FIG. 314. Igualador T en puente a resistencia constante

Nuestro igualador en puente o celosía figura 315 no difiere ahora del que tenemos en la figura 315 bis más que en que se ha insertado una resistencia R_o, en una diagonal en serie con el generador E, y en que las impedancias Z_A y Z_B se han reemplazado por las dos impedancias inversas, mostradas debajo de la figura 315 bis y en las que Z_1 y Z_2 son también inversas.

Como la malla es simétrica, de la primera de las dos ecuaciones finales anteriores resulta $Z_{12} = Z_{34} = R_o$, y en la segunda, reemplazando Z_A por su valor, se llega a la expresión de I_L', y, por tanto, a la expresión general de las pérdidas de inserción.

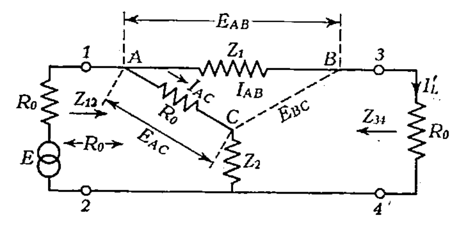


FIG. 314 bis. Circuito equivalencia del T en puente

En el cuadro siguiente se resumen las características de todos estos tipos de igualadores. Debe hacerse notar que si las impedancias inversas son puramente resistivas como, por ejemplo, $Z_1 = R_o/(k - 1)$ y $Z_2 = R_o/(k - 1)$, donde k es una constante, el igualador degenera en un atenuador cuyas pérdidas de inserción, ahora constantes o independientes de la frecuencia, valen

$$P\,I = 20 \log \frac{R_o + R_o\,(k - 1)}{R_o} = 20 \log k.$$

Impedancias inversas reactivas puras. En este caso, la estructura más sencilla es una inductancia y una capacidad o recíprocamente,

Tipos de igualadores

Cuadripolo	Tipo	Z_2	Z_{34}
	Serie simple	Variable	Variable
	Paralelo simple	Variable	Variable
	Serie completo	R_0	Variable
	Paralelo completo	R_0	Variable
	Tipo T	R_0	R_0
	T en puente	R_0	R_0
	En celosía o puente	R_0	R_0

Nota: Para todos $Z_1\ Z_2 = R_0^2$

$$P.\ I. = 20 \log \frac{I}{I} = 20 \log \frac{R_0 + Z_1}{R_0} = 20 \log \frac{R_0 + Z_2}{Z_2}$$

combinadas en los distintos tipos que dimos inicialmente; en la fórmula de las pérdidas de inserción aparecen éstas en función de las f/f_c, frecuencias relativas a la de corte, que queda definida, como hemos visto tantas veces, por la condición de que las pérdidas de inserción sean de 3 dB, o, lo que es equivalente, la frecuencia f_c, para la que un elemento reactivo de la pareja, y, por tanto, el otro, toma un valor

en ohmios de su reactancia precisamente igual a R_o. Todos los elementos del igualador quedan determinados por R_o y la mencionada frecuencia de corte.

Un poco más complicado es el caso de que Z_1 y Z_2 estén formadas por un circuito resonante y un antirresonante o recíprocamente; entonces, además de la frecuencia de corte anterior f_c, aparece la de resonancia f_r de Z_1 y antirresonancia de Z_2, y si se llama $a = f_r/f_c$ siempre mayor que uno, las pérdidas de inserción y los valores correspondientes a los elementos de cada igualador, pueden obtenerse a partir de este parámetro a y f/f_r (o frecuencias referidas a f_r), y de R_o y a respectivamente. Para cada tipo de igualador se pueden construir varias curvas de la familia de parámetro a, que constituye la expresión de las pérdidas de inserción ([1]), y estas curvas universales para ese tipo de igualador se manejan como hicimos al tratar de las correspondientes al acoplo resistencia-capacidad de los amplificadores; o bien tomando papel semilogarítmico a las mismas escalas en las cuales se ha dibujado la familia, y superponiendo la frecuencia de resonancia del igualador a diseñar con el punto $f/f_r = 1$ en la familia de curvas; de este modo se tiene, para cada valor del parámetro a y en la curva correspondiente, la pérdida de inserción correspondiente a cualquier frecuencia.

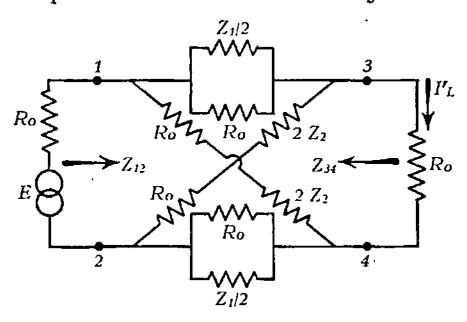


FIG. 315. Igualador tipo celosía

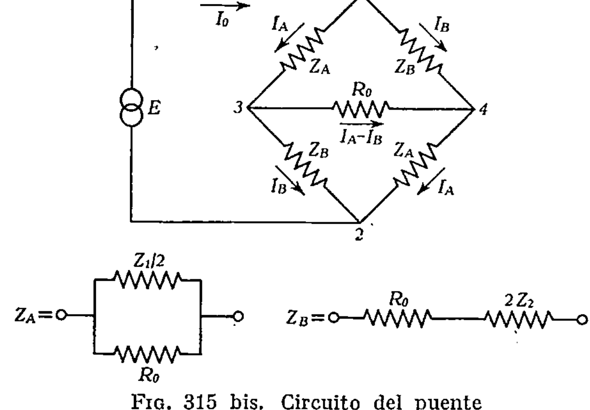


FIG. 315 bis. Circuito del puente

Finalmente, un caso un poco más complicado todavía se presenta cuando tanto Z_1 como Z_2 presentan elementos resistivos además de los reactivos, en los que aparece otra nueva frecuencia crítica f_m para la cual las pérdidas de inserción del igualador se reducen a la mitad de las máximas. En este caso, los dos impedancias Z_1 y Z_2 pueden

([1]) Dando para cada una un valor particular a a.

adoptar una de las dos configuraciones que se muestran en la figura 316, de las cuales sólo consideramos la primera, ya que la segunda se deduce de la primera por inversión. En la primera, la condición de ser inversas Z_1 y Z_2 respecto a R_o nos dará:

$$(a\,R_o + j\,X_1)\,\frac{j\,R_o\,X_2\,b}{b\,R_o + j\,X_2} = R_o^2; \quad -X_1\,X_2 = R_o^2; \quad b = \frac{1}{a}$$

que muestra que los elementos reactivos deben ser inversos y conjugados respecto a R_o, y que los números reales a y b deben ser inversos o recíprocos; tales condiciones se cumplen tomando $a = k - 1$ y $b = 1/k - 1$, o recíprocamente, como se ve en la figura 316.

Si consideramos el primer tipo de brazos de la figura 316, se tiene para expresión de las pérdidas de inserción:

$$P\,I = 20 \cdot \log \frac{R_o + (k-1)\,R_o + j\,X_1}{R_o} = 20 \log k + 20 \log \frac{R_o + j\,\dfrac{X_1}{k}}{R_o}$$

en ella se ve que se puede suponer formado por un atenuador de pérdidas constantes e iguales a $20 \cdot \log k$ para toda frecuencia (por esto hemos tomado antes $a = k - 1$) y de un igualador cuyas impedancias son:

$$Z_1 = jX_1/k \quad \text{y} \quad Z_2 = jkX_2$$

a lo que hubiéramos llegado también por identificación.

Para el segundo par de la figura 316 se tiene, como valor de Z_1,

$$Z_1 = \frac{j\,R_o\,X_1\,(k-1)}{R_o\,(k-1) + j\,X_1}$$

con lo cual las pérdidas de inserción toman la forma

$$P\,I = 20 \log \frac{R_o\,(k-1) + j\,k\,X_1}{R_o\,(k-1) + j\,X_1}, \text{ y tomando módulos,}$$

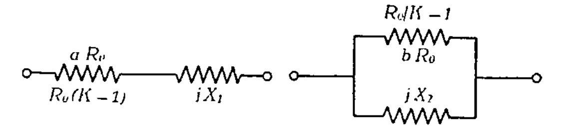
$$P\,I = 10 \log \frac{R_o^2\,(k-1)^2 + k^2\,X_1^2}{R_o^2\,(k-1)^2 + X_1^2} = 10 \log \left[1 + \frac{k^2 - 1}{1 + (k-1)^2 \left(\dfrac{X_2}{R_0}\right)^2}\right]$$

Hagamos ahora los mismos distingos que hicimos para igualadores dipolos, según los valores de X_1, es decir, que sea cero, infinito y que la reactancia X_m correspondiente a una frecuencia f_m reduzca el término detrás del logaritmo al valor k, con lo que las pérdidas de inserción a esa frecuencia f_m se reducen a la mitad de las máximas; así, para $X_1 = 0$, las $P\,I = 10 \cdot \log 1 = 0$; para $X_1 = \infty$, las pérdidas de

inserción, que son las máximas, valen $P\,I = 10 \cdot \log k^2 = 20 \cdot \log k$; finalmente, para una cierta X_m tal:

$$\frac{R_0^2 (k-1)^2 + k^2 X_m^2}{R_0^2 (k-1)^2 + X_m^2} = k, \text{ o sea, } X_{1m} = R_o \frac{k-1}{\sqrt{k}}$$

y, como hemos anticipado, las pérdidas de inserción se reducen a la mitad de las máximas. En este segundo caso, de estar Z_1 formada por $R_o\,(k-1)$ en paralelo con un elemento reactivo y en el que cabe



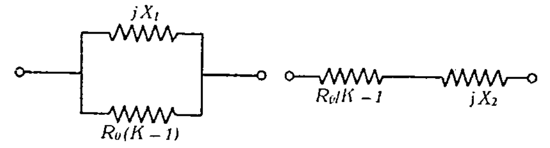


FIG. 316. Par de brazos inversos. General con elementos resistivos y reactivos, respecto R_0

que éste sea un condensador, una bobina, un circuito resonante o uno antirresonante, vamos a hacer como ejemplo este último, que puede presentar mayor complicación, pudiendo servir de guía al lector para el desarrollo de los demás como ejercicio muy útil.

La componente reactiva de Z_2 vale

$$X_2 = L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega} = L_2\omega_r \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{1}{L_2 C_2 \omega\omega_r}\right);$$ pero, por definición,

$L_2 C_2 \omega_r^2 = 1$, y de otra parte, llamando $b = \dfrac{f_r}{f_m}$, se tiene

$X_2 = L_2\omega_r \left(\dfrac{\omega}{\omega_r} - \dfrac{\omega_r}{\omega}\right)$, que para $\omega = \omega_m$ se convierte en $X_{2m} =$

$$= + L_2\omega_r \left(\frac{f_m}{f_r} - \frac{f_r}{f_m}\right) = + L_2\omega_r \left(\frac{1}{b} - b\right) = L_2\omega_r \left(b - \frac{1}{b}\right)$$

y reemplazando $X_{2m} = R_o \dfrac{\sqrt{k}}{k-1}$ y $L_2\omega_r$ por el valor último, en la expresión de X_2 se tiene:

$$X_2 = R_o \frac{\sqrt{k}}{k-1} \frac{\dfrac{f}{f_r} - \dfrac{f_r}{f}}{b - \dfrac{1}{b}}$$

con ello, la expresión últimamente hallada de las pérdidas de inserción toma la forma

$$P\ I = 10 \cdot \log \left[1 + \frac{k^2 - 1}{1 + k \left(\dfrac{f/f_r - f_r/f}{b - \dfrac{1}{b}} \right)^2} \right]$$

y los valores de las constantes del circuito vienen dadas por:

$$L_2 = \frac{R_o}{\omega_r} \cdot \frac{\sqrt{k}}{k - 1} \cdot \frac{b}{b^2 - 1} = \frac{R_o}{\omega_m} \cdot \frac{\sqrt{k}}{k - 1} \cdot \frac{1}{b^2 - 1}$$

$$C_2 = \frac{1}{L_2\, \omega_r^2} = \frac{1}{L_2\, b^2\, \omega_m^2} = \frac{1}{R_o\, \omega_m} \cdot \frac{k - 1}{\sqrt{k}} \cdot \frac{b^2 - 1}{b^2}$$

y puesto que Z_1 y Z_2 son inversas, se debe tener: $L_1 = C_2 R_o^2$ y $C_1 = L_2/R_o^2$, con lo que se tiene:

$$L_1 = \frac{R_o}{\omega_m} \cdot \frac{k - 1}{\sqrt{k}} \cdot \frac{b^4 - 1}{b^2} \quad \text{y} \quad C_1 = \frac{1}{\omega_m\, R_o} \cdot \frac{\sqrt{k}}{k - 1} \cdot \frac{1}{b^2 - 1}$$

Se pueden construir familias de curvas de pérdidas de inserción para cada valor de k, que representa la máxima pérdida, y varios valores de b,

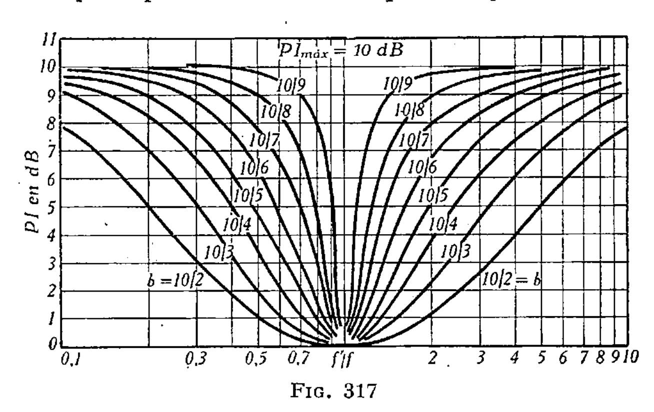


Fig. 317

cada uno de los cuales dará una curva de la familia, y emplear estas curvas, como hemos indicado varias veces; figura 317 para $k = 10$ dB.

En definitiva, para el diseño de un igualador se requiere conocer, según los casos: la máxima pérdida de inserción dada por $20 \cdot \log k$, las frecuencias de resonancias f_r, de corte f_c y aquella para la cual las pérdidas de inserción se reducen a la mitad f_m, y los parámetros $b = f_r/f_m$ y $a = f_r/f_c$, ambos mayores que uno. Con estos datos o algunos de ellos, cuando el igualador sea menos complicado, la respuesta queda perfectamente caracterizada.

Atenuadores

Incidentalmente, hemos visto, al hablar de los igualadores, que cuando sus elementos componentes son puramente resistivos, éstos degeneran en *atenuadores;* es decir, las pérdidas de inserción son constantes para todas las frecuencias, y, por tanto, sin alterar la respuesta en frecuencias del sistema de transmisión, se consigue una reducción en la tensión, corriente o potencia recogida en la carga R_L del atenuador, con respecto a la misma magnitud en R_g. Esta reducción se busca deliberadamente, como indicamos ya en otro lugar, a fin de ajustar el volumen del sonido, según las necesidades del registro o reproducción del mismo. Las pérdidas de inserción así obtenidas reciben en este caso el nombre de *pérdidas de atenuación* (P. A.) o simplemente atenuación, y según las necesidades pueden ser fijas o variables, lo que califica a los atenuadores correspondientes.

En el caso de trabajar el atenuador entre impedancias resistivas iguales a R_o, y satisfaciendo además a la condición de inversión, el cuadro de la figura 318 da una clasificación correlativa de la empleada en los igualadores, para los atenuadores y en él se dan, además, los valores de las constantes de cada brazo, en función de la resistencia R_o y el factor de atenuación k, siendo en todos los casos las pérdidas de atenuación $= 20 \cdot \log k$. Al igual que entonces, los tipos serie y paralelo completo sólo conservan la $Z_{12} = R_o$ e independiente de k, mientras que Z_{34} varía con ésta; los otros tres tipos más complicados presentan ambas impedancias de entrada y salida constantes de valor R_o. La importancia de esta conservación de las impedancias Z_{12} y Z_{34} tiene mucho interés porque contribuye al equilibrio de impedancias con R_g y R_L independiente de la atenuación introducida, y se evita la deformación en frecuencia y fase, así como la pérdida de rendimiento que de otro modo se realizaría.

En el caso más general de ser R_g y R_L distintas y conocido el valor de éstas, se plantean tres tipos de problemas en relación con los atenuadores:

a) Determinar las características del atenuador que nos proporcione el equilibrio entre R_g y R_L con las mínimas pérdidas de atenuación (atenuador en L).

b) El mismo problema, pero con pérdidas de atenuación prefijadas y superiores a ese valor mínimo (atenuador en T).

c) Suponiendo $R_g = R_L = R_o$, calcular el atenuador que produce unas pérdidas de atenuación prefijadas de antemano, y mantiene el equilibrio de impedancias. (Atenuador en T simétrico).

Los tres tipos de atenuadores más corrientemente usados en el caso general, aparte de los dados en el cuadro anterior para impedancias iguales, son el potenciómetro ordinario o divisor de tensión, el atenuador en L y el atenuador en T; derivados de éstos son los en H y en U, que se obtienen repartiendo por igual las resistencias serie entre los dos hilos de la línea.

Potenciómetro o divisor de tensión. Este tipo de atenuador sólo mantiene la impedancia de entrada constante e igual al valor total de su resistencia en el caso de que la impedancia R_L sobre la que trabaja sea prácticamente infinita, de modo que no consuma corriente:

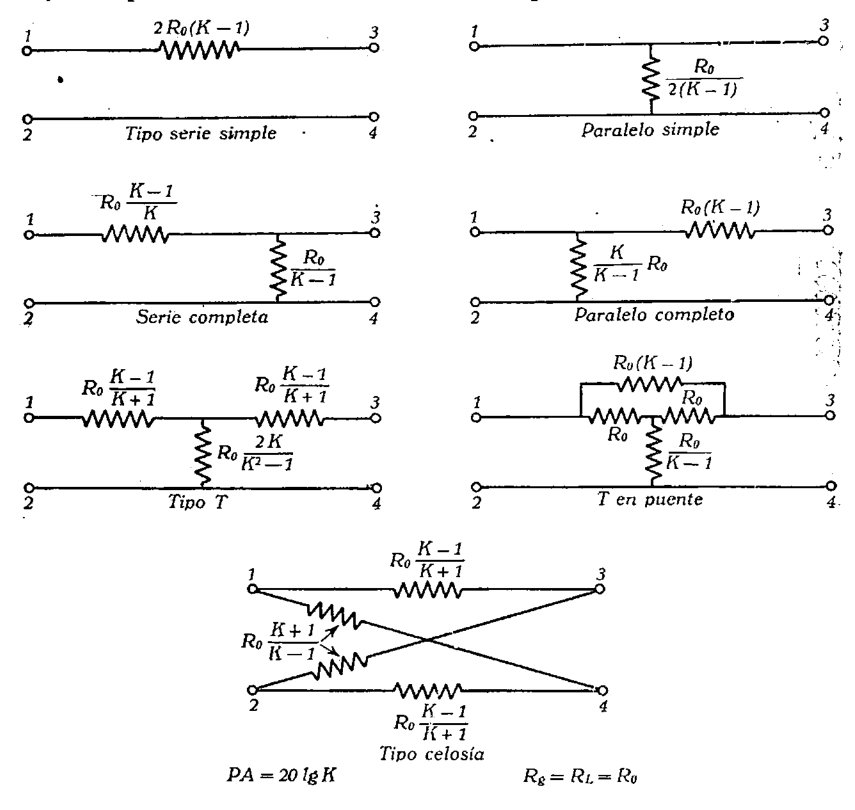


FIG. 318. Circuitos de atenuadores

entonces se puede elegir la resistencia total igual a R_g, y las dos resistencias en que queda dividido R_1 y R_2 se determinan por las condiciones:

$$R_g = R_1 + R_2, \quad k = V_L/V_g = R_2/R_g$$

con lo cual, los valores para una atenuación dada k se obtendrán así:

$$R_2 = kRg \; ; \; R_1 = R_g\,(1 - k) \; ; \; P.\,A. = 20 \log k = 20 \log \frac{R_2}{R_g}$$

en la tabla (pág. 458) se dan los valores de R_1 y R_2 para distintas atenuaciones en decibelios y una $R_g = 500\ \Omega$; para otros valores distintos de R_g, bastará dividir los valores de R_1 y R_2 por la relación

$r = R_g/R_g'$ para obtener los valores correspondientes que con la misma atenuación k conserven R_g'.

Existe la creencia muy generalizada, pero errónea, de que el uso de un atenuador en T que conserva las dos impedancias da siempre mejores resultados que el circuito de un potenciómetro ordinario, tal como lo acabamos de determinar, lo cual no es forzosamente cierto en todos los casos, y en algunos, el uso del atenuador en T, *no sólo es innecesario, sino antieconómico*. Así, en el caso de la figura 319, es prácticamente imposible lograr el equilibrio de impedancias, ya que las limitaciones prácticas de un atenuador en T o en H imponen a éstos una impedancia máxima aproximada de unos 50 000 Ω, valor pequeño frente a la del circuito de rejilla. De otra parte, puesto que la rejilla en clase «*A*» no consume prácticamente ninguna corriente, no habrá caída de tensión en la parte activa de R_2, y, por consiguiente, el circuito de la figura 319 *a* degenera en el *b*, que es un potenciómetro ordinario. De aquí resulta que cuando se quiera utilizar un control de volumen, en el circuito de rejilla de una válvula en clase A, o en aquellos circuitos en que R_L es muy grande comparada con R_g (la recíproca también es cierta invirtiendo el potenciómetro), lo más práctico y económico es emplear un divisor de tensión ordinario.

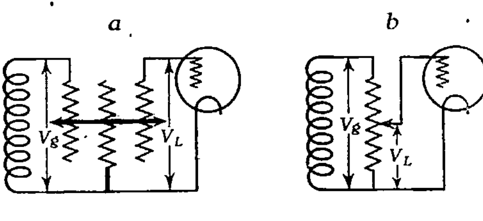


FIG. 319

Atenuador en L. Cuando R_L no puede tomarse como infinito, pero sólo interesa conservar la impedancia Z_{12} (o la Z_{34}, en cuyo caso se invierte la L) constante e independiente de la atenuación k, se utiliza este tipo de atenuador, que permite equilibrar dos impedancias desiguales con las menores pérdidas posibles; la resistencia serie se coloca siempre del lado de la impedancia mayor.

Consideremos el caso un poco más general del atenuador en T caracterizado por sus tres resistencias R_a y R_b en serie y R_c en paralelo; según dijimos, para que las pérdidas de inserción sean las mínimas, es decir, para que se reduzcan a pérdidas de atenuación, las impedancias de carga deben ser iguales a sus impedancias-imágenes, y, por tanto:

$$R_g = R_a + \frac{R_c\,(R_b + R_L)}{R_b + R_c + R_L}; \quad R_L = R_b + \frac{(R_g + R_a)\,R_c}{R_g + R_a + R_c}; \quad (a)$$

en estas condiciones, las pérdidas mínimas de inserción serán las que nos dé la relación $20 \cdot \log I/I'$ (¹) entre las corrientes en R_L con un trans-

(¹) Para no tomar en cuenta el signo —.

formador ideal, que, como vimos, valen $I = \frac{e}{2\sqrt{R_L R_g}}$, y la que hay después de la inserción de atenuador, que vale

$$I' = \frac{e}{2 R_g} \cdot \frac{R_c}{R_b + R_c + R_L};$$

por consiguiente, estas pérdidas mínimas valdrán

$$PA = 20 \log \frac{R_g (R_b + R_c + R_L)}{R_c \sqrt{R_L \cdot R_g}}$$

esta expresión muestra que las pérdidas de atenuación serán mínimas cuando $R_b = 0$; es decir, *para equilibrar dos impedancias* R_g *y* R_L *e introducir las pérdidas mínimas indispensables, se debe utilizar un atenuador en L;* en estas condiciones:

$$PA_{min} = 20 \log \cdot \frac{R_g}{R_c} \cdot \frac{R_c + R_L}{\sqrt{R_g R_L}} = 20 \log \sqrt{\frac{R_g}{R_L}} \left(1 + \frac{R_L}{R_c}\right)$$

y las relaciones entre las resistencias quedan reducidas a:

$$R_g = R_a + \frac{R_c R_L}{R_c + R_L}; \qquad R_L = \frac{(R_a + R_g) R_c}{R_a + R_c + R_g};$$

entre estas dos últimas relaciones podremos determinar los valores de R_a y R_c en función de las R_g y R_L, obteniéndose:

$$R_a = \sqrt{R_g (R_g - R_L)}$$

$$R_c = \frac{R_L \sqrt{R_g}}{\sqrt{R_g - R_L}}, \qquad \text{o bien} \quad \begin{cases} R_a^2 = R_g^2 - R_g R_c \\ R_c = \dfrac{R_g R_L}{R_a} \end{cases}$$

y con ello para expresión de las pérdidas atenuantes mínimas:

$$PA_{min} = 20 \log \left[\sqrt{\frac{R_g}{R_L}} + \sqrt{\frac{R_g - R_L}{R_L}} \right] =$$

$$= 10 \log \frac{2 R_g - R_L + \sqrt{4 R_g (R_g - R_L)}}{R_L}$$

Dadas, pues, dos impedancias $R_g > R_L$, en ningún caso podrá obtenerse, mediante intercalación de una T o una L, pérdidas infe-

riores al valor dado por esa expresión, por cuya razón siempre que se den de antemano las pérdidas de atenuación de un atenuador cuyos brazos debemos determinar, debe comprobarse que tales pérdidas superan a las dadas por dicha expresión, si el problema ha de ser posible.

Obsérvese que en el caso particular de que $R_g = R_L = R_o$, se verifica $R_c \times R_a = R_o^2$, y, por tanto, estamos en el caso del atenuador tipo serie o paralelo completo, cuyas constantes en función de la atenuación k están ya determinadas en el cuadro que dimos antes (fig. 318), de las cuales se deducen fácilmente los valores de la impedancia no constante en cada tipo; así, para el serie completo:

$$Z_{12} = R_o \quad \text{y} \quad Z_{34} = R_o \frac{2k - 1}{k^2 + (k-1)^2},$$

mientras que para el paralelo completo:

$$Z_{12} = R_o \quad \text{y} \quad Z_{34} = \frac{R_o \, 2k^2}{2k-1}$$

a) **Atenuador en T sobre impedancias desiguales $R_g > R_L$.** En este caso, las dos expresiones antes halladas (α) son de aplicación, para que no haya pérdidas por reflexión, o se conserve el equilibrio de impedancias, y ambas unidas a la que da el valor de las pérdidas que se desean obtener en cada caso $20 \cdot \log k = 20 \cdot \log I/I'$, nos dan tres relaciones para determinar los valores de R_a, R_b y R_c, para lo cual procederemos (¹) como sigue:

Llamando K la relación entre las corrientes en R_L y R_g respectivamente, después de lo dicho en el Capítulo XIV, tendremos:

$$k = \frac{R_c}{R_c + R_b + R_L} \sqrt{\frac{R_L}{R_g}};$$

e invirtiendo ahora el generador que colocamos en serie con R_L y aplicando el *teorema de reciprocidad* (²):

$$k = \frac{R_c}{R_a + R_c + R_g} \sqrt{\frac{R_g}{R_L}}$$

(¹) Obsérvese que aquí no es posible, como antes, obtener R_a, R_b y R_c independientemente de k, porque sólo disponemos, prescindiendo de la expresión de k, de dos relaciones para determinar tres desconocidas, mientras que antes sólo había dos desconocidas; como ahora K puede ser arbitraria, es natural que dependan de k tales incógnitas.

(²) El teorema se enuncia así: Cuando un generador se conecta a un par de terminales de un cuadripolo pasivo y se conecta un amperímetro en los otros dos terminales, se pueden intercambiar el generador y amperímetro sin alterar la lectura de éste.

entre estas dos ecuaciones y las (α) se llega a obtener, después de enojosas transformaciones:

$$R_a = \frac{2\,k\sqrt{R_L\,R_g}}{1-k^2}\left[\frac{1}{k}\sqrt{\frac{R_g}{R_L}} - 1\right] - R_g$$

$$R_b = \frac{2\,k\sqrt{R_L\,R_g}}{1-k^2}\left[\frac{1}{k}\sqrt{\frac{R_L}{R_g}} - 1\right] - R_L$$

$$R_c = \frac{2\,k\sqrt{R_L\,R_g}}{1-k^2}$$

Estas expresiones se transforman fácilmente en la siguiente forma más sencilla:

$$R_a = R_c\,(B-1) - R_g \qquad R_b = R_c\,(A-1) - R_L \qquad R_c = \frac{2\,R_g}{B-\frac{1}{A}}$$

$$\text{con}\begin{cases} A = \frac{1}{k}\sqrt{\frac{R_L}{R_g}}\,, & L_{dB} = 20\log k \\ B = \frac{1}{k}\sqrt{\frac{R_g}{R_L}}\,, & k = \text{antilog}\,\frac{L_{dB}}{20} \end{cases}$$

aun escritas en esta forma, resultan muy laboriosas, cuando se trata de hacer aplicaciones prácticas de las mismas, por lo que J. F. Blackburn, de Hollywood, las ha transformado y tabulado de la siguiente manera:

$$R_c = P_2\sqrt{R_L\,R_g}$$

$$R_a = P_1\,R_g - P_2\sqrt{R_L\,R_g} = P_1\,R_g - R_c \quad \text{con} \quad P_1 = \frac{1+k^2}{1-k^2}$$

$$R_b = P_1\,R_L - P_2\sqrt{R_L\,R_g} = P_1\,R_L - R_c \qquad P_2 = \frac{2\,k}{1-k^2}$$

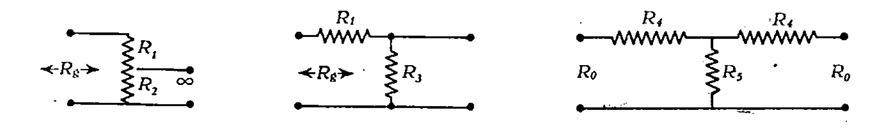
y es a partir de estas expresiones últimas, de donde se ha obtenido el ábaco, muy práctico, de la figura 320, que nos permite resolver los tres problemas de atenuadores enunciados al principio de este párrafo, según la forma indicada a la derecha de dicha figura.

b) **Atenuador en T simétrico.** Aun cuando está incluído en el cuadro de atenuadores que trabajan entre impedancias iguales a R_o, vale la pena de sacarlo del ejemplo anterior, suponiendo dicha condición complementaria; en tal caso, la condición de conservación de la impedancia exige que entre las resistencias exista la relación

$$R_o = R_a + \frac{(R_a + R_o)\,R_c}{R_a + R_c + R_o}, \quad \text{es decir,} \quad R_o^2 = R_a^2 + 2\,R_a\,R_c,$$

Tabla para el cálculo de atenuadores

Todos para circuitos de 500 Ω



dB	k (1)	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	P_1	P_2
1	0,891	54,5	445	4090	28,7	4340	8,68	8,68
2	0,794	103	397	1925	57,3	2160	4,42	4,30
3	0,708	146	354	1162	85,6	1420	3,02	2,86
4	0,631	185	315	855	113	1100	2,32	2,10
5	0,562	219	281	643	140	823	1,94	1,64
6	0,501	250	250	502	166	670	1,67	1,34
7	0,447	277	223	405	191	559	1,45	1,04
8	0,398	301	199	331	215	473	1,38	0,94
9	0,355	323	177	274	238	406	1,28	0,800
10	0,316	342	158	231	260	352	1,22	0,704
11	0,282	359	141	197	280	301	1,17	0,615
12	0,251	375	125	168	299	268	1,12	0,540
13	0,224	388	112	144	317	236	1,10	0,475
14	0,200	400	100	125	334	208	1,08	0,420
15	0,178	411	88,9	108	350	184	1,06	0,368
16	0,156	421	79,3	91,4	364	155	1,04	0,326
17	0,141	430	70,7	82,2	376	134	1,03	0,289
18	0,126	437	63,0	72,1	388	123	1,03	0,256
19	0,112	444	56,1	63,2	399	112	1,02	0,227
20	0,100	450	50,0	55,6	409	101	1,02	0,202
21		455	44,5	48,9	418	89,8		
22		460	39,7	43,2	426	80,0		
23		465	35,4	38,1	435	71,2		
24		469	31,5	33,6	441	63,2		
25	0,0562	472	28,1	29,8	447	56,3	1,00	0,112
26		475	25,0	26,3	452	50,1		
27		478	22,3	23,4	457	44,7		
28		480	19,9	20,7	461	39,9		
29		482	17,7	18,4	466	35,5		
30	0,0316	484	15,8	16,3	469	31,7	1,00	0,064
35	0,0178	491	8,89	9,05	483	17,8	1,00	0,036
40		495	5,00	5,05	490	10,0		
45		497	2,81	2,83	495	5,62		
50		498	1,58	1,59	497	3,16		
55		499	0,889	0,890	498	1,78		
60		500	0,500	0,500	499	1,00		

(1) k es la relación de tensiones o corrientes que puede calcularse a partir de las tablas de las páginas 377-380 para una atenuación dada en dB.

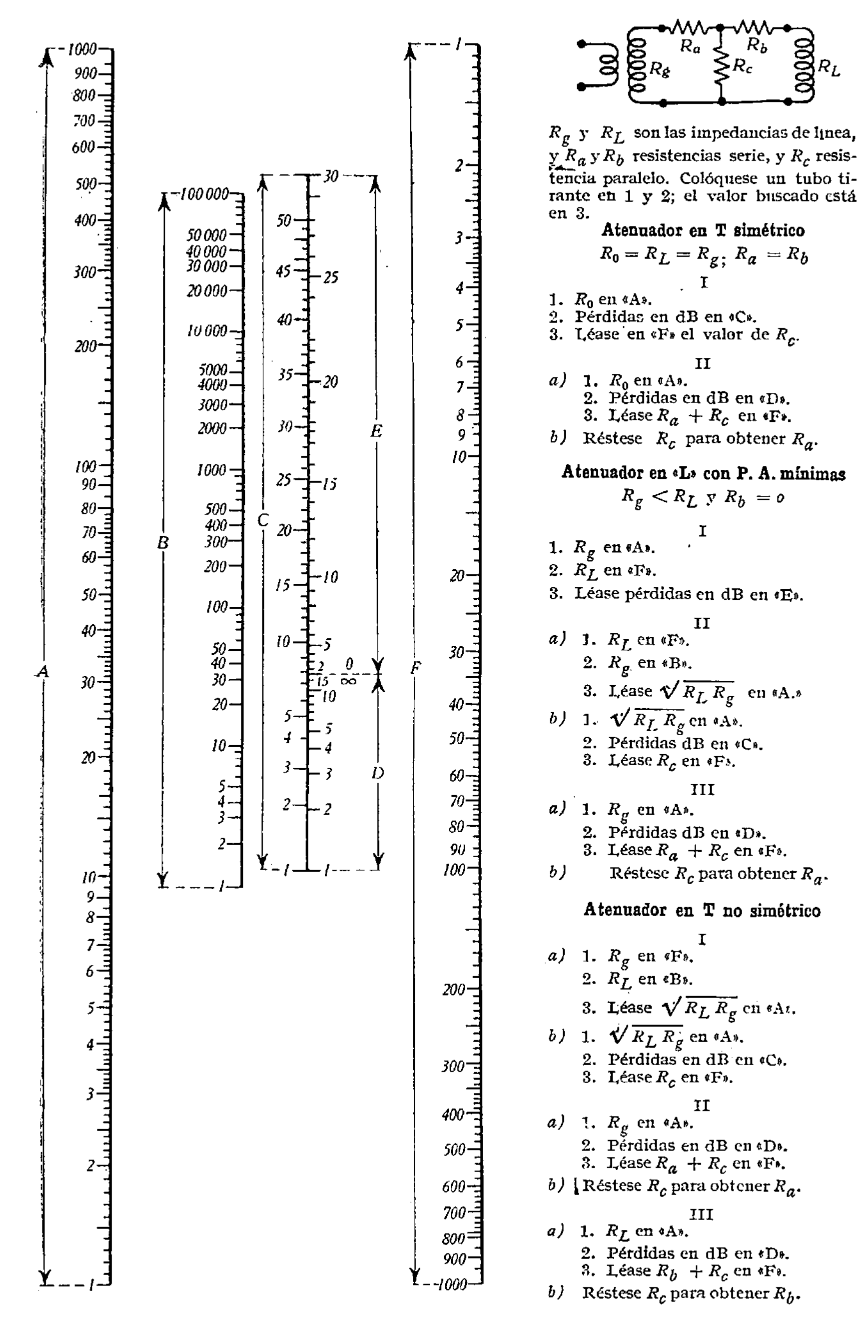


FIG. 320. Relación entre pérdidas en decibelios y resistencias precisas para el cálculo de atenuadores

de importancia en el estudio de los mezcladores de sonido, como veremos en otro lugar [1]; todas las expresiones se simplifican notablemente

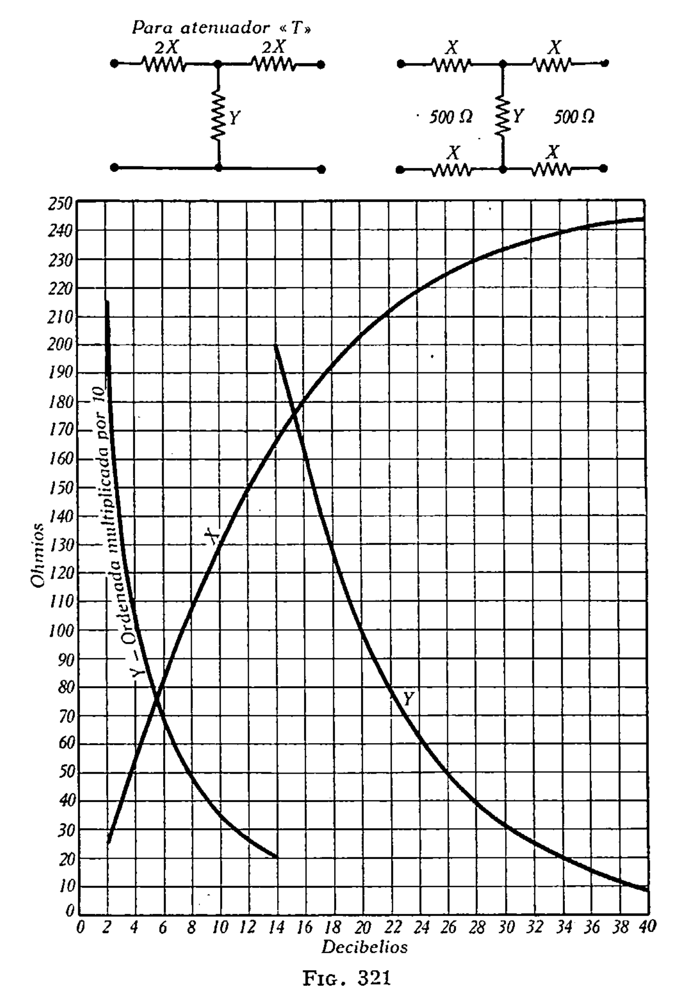


FIG. 321

ahora, convirtiéndose en las siguientes:

$$R_a = R_o \frac{1 - k}{1 + k}; \quad R_c = R_o \frac{2k}{1 - k^2}$$

Para este tipo de atenuador, puede ser de gran utilidad el gráfico de la figura 321.

---

[1] Curso de Cine Sonoro (II Registro).

Observaciones. En relación con el uso de los ábacos y tablas para cada tipo de atenuador, conviene tener en cuenta algunas circunstancias de interés. En principio, el atenuador en L se suele emplear cuando se quiere mantener constante la impedancia en un solo sentido y equilibrar dos impedancias distintas con las pérdidas mínimas.

Los atenuadores en T se utilizan cuando la impedancia del atenuador debe equilibrar la impedancia de carga, en casos en que la impedancia de entrada es muy crítica, como sucede en los mezcladores y en ciertos tipos de amplificadores. Si se quiere que las dos líneas estén equilibradas, basta, como para el tipo en L, calcular los valores de las resistencias serie, como en el caso usual, y luego repartirla mitad en cada hilo de la línea, obteniéndose así el clásico atenuador en H.

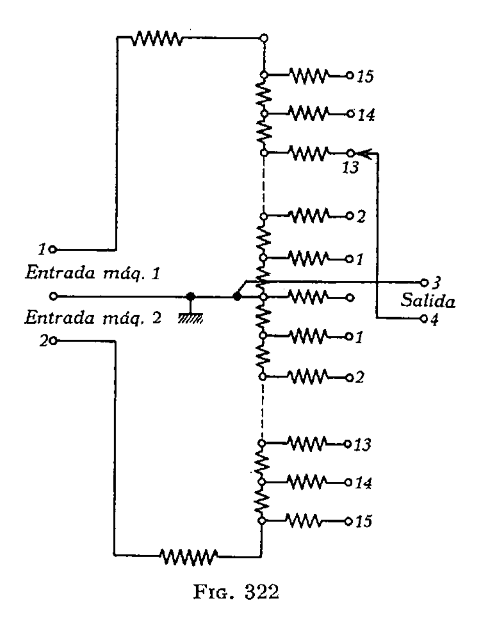


FIG. 322

Los valores dados en las tablas y ábacos anteriores son para el caso de ser $R_g = R_L = 500\ \Omega$; cuando R_o tome otro valor distinto, los brazos pueden calcularse a partir de los de $500\ \Omega$, multiplicando estos valores por la relación $R_o/500$. Una discrepancia de un 5 % en los valores dados en las tablas, origina en todos los casos un desequilibrio que no excede de 0,5 dB de pérdida originada por el mismo, lo que sólo en determinados casos especiales puede ser de interés tomar en cuenta.

Atenuador tipo potenciómetro compensado. Hemos dicho que el potenciómetro ordinario sólo puede ser utilizado a condición de que la impedancia de carga sea prácticamente infinita, y que en cierto modo era equivalente a un atenuador en L, el cual, como sabemos, no conserva su Z_{34} independiente del grado de atenuación. Cuando, como es el caso corriente, se trata de un atenuador variable, en cuanto al valor de k, se recurre a intercalar resistencias adicionales, entre el contacto móvil y los distintos contactos del devanado del potenciómetro, tal como se ve en la figura 322, con lo cual se logra mantener constante la impedancia de salida del atenuador, a condición de dar un valor conveniente a dichas resistencias adicionales; es muy fácil, contemplando la figura, darse cuenta de que lo que se hace entonces es convertir el atenuador en potenciómetro, en un atenuador en T, y los valores de esas resistencias se calculan con tal condición para cada posición; éste es el tipo más usual de atenuador empleado como Fader.

Atenuadores variables y su empleo en reproducción sonora. En la mayoría de los casos, los atenuadores de cualquier tipo no son fijos, sino que sus brazos están constituídos por secciones de resistencias que son intercaladas en circuito para cada valor de la atenuación k que se desea; esto se hace generalmente mediante llaves, o bien por contactos que se desplazan, dejando inactivas las resistencias que no sean precisas o mediante una regleta, tal como se ve esquemáticamente en la figura 323. Esos saltos o etapas de paso de una posición

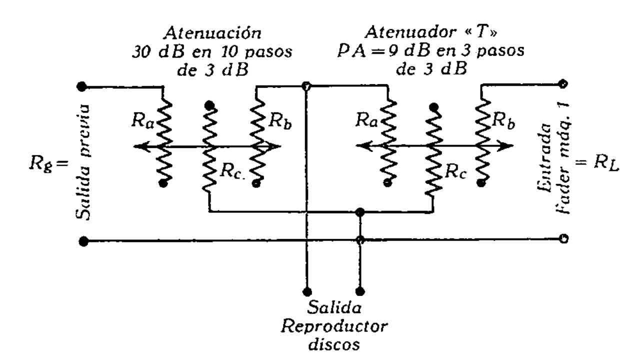


FIG. 323. Atenuadores para nivelar, disco con sonido de fotocélula y máquinas entre sí

a otra suelen ser del orden de los 3 dB, y la misma figura muestra la disposición de un atenuador de conexión del amplificadorp revio de una de las cabezas de sonido subdividido en dos: la primera T tiene por objeto nivelar la salida del amplificador previo con el reproductor de discos, a fin de tener sensiblemente el mismo volumen o nivel para excitar el amplificador principal, mientras que la segunda sección en T sirve para nivelar entre sí el volumen de salida de las dos máquinas del equipo. La salida de esta T se encuentra conectada en muchos casos, a la entrada de Fader o atenuador principal variable, el cual regula con su atenuación la entrada o excitación del amplificador principal. Este último está representado esquemáticamente en la figura 322, y se comprueba que para cada máquina es del tipo potenciómetro compensado con pasos de 3 en 3 dB, hasta 15 pasos; generalmente, los dos primeros pasos de máxima atenuación suelen ser algo mayores, lo que tiene por objeto facilitar el cambio de una máquina a la otra. El contacto móvil está montado sobre un eje, que permite, mediante rotación, pasar del circuito de una a la otra máquina sin solución de continuidad.

XVII. Redes divisoras y líneas de baja frecuencia (1)

Redes o mallas divisoras de frecuencias

En el diseño de equipos lineales reproductores de sonido es deseable reproducir totalmente todas las frecuencias entre los 30 ó 50 y los 8000 c/s, y para ello, una práctica corriente consiste en dividir la gama de frecuencias en dos o más partes y prever uno o más altavoces para cada uno de esos intervalos parciales de frecuencias. Los altavoces empleados para las distintas bandas de frecuencias tienen características diferentes, estando cada uno diseñado especialmente para su propia banda. Como no es posible construir altavoces que reproduzcan plenamente y con eficacia todas las frecuencias de una banda, y atenúen bruscamente las frecuencias exteriores a esa banda, se requiere utilizar una red o malla intercalada entre el amplificador de potencia y los altavoces que permita suministrar la correcta banda de frecuencias a cada una de las series de altavoces; estas redes se llaman por esto *redes divisoras de frecuencias* (2).

En la práctica, los sistemas de altavoces pueden ser de dos o de tres canales o bandas; así, el sistema Western Electric, llamado Wide Range, emplea tres canales de 30 a 300, de 300 a 3000 y de 3000 a 8000 c/s, y el Microphonic, Westrex, y R.C.A. dos canales; debido al uso hoy generalizado del último tipo, sólo de él nos vamos a ocupar.

Para el sistema de dos canales *(two-way)*, los altavoces que reproducen las frecuencias bajas se llaman altavoces de la banda baja o baja frecuencia, mientras que los de la otra banda se llaman altavoces de la banda alta o alta frecuencia; para cada una de las dos bandas de frecuencias, un solo reproductor o un número de reproductores se agrupan en combinaciones serie-paralelo, con el fin de asegurar la carga combinada más adecuada.

Las redes divisoras no son usualmente de corte brusco o agudo, esto es, no transmiten uniformemente las frecuencias de una banda

---

(1) La casi totalidad de este capítulo está tomada del magistral trabajo de H. Kimball, *Dividing Networks for Loud-speaker Systems*, 1938, e información de la *Jemen Mftg C.°*.

(2) Por otra parte el hecho de concentrarse las frecuencias en un ángulo más cerrado a lo largo del eje del altavoz, a medida que aumentan aquéllas de valor, obliga a tal división si se quiere repartir uniformemente el sonido en un local o espacio prefijado.

dada y atenúan bruscamente todas las demás, sino que más bien transmiten casi uniformemente su propia banda de frecuencias y descienden gradualmente en el extremo en que la banda propia coincide con la otra banda. Ello origina un cierto recubrimiento entre las bandas de frecuencias prefijadas; es claro que, teóricamente, lo ideal sería diseñar las redes divisoras con una frecuencia de corte brusco o agudo, pero la pendiente de la respuesta en la frecuencia de corte es, desde el punto de vista económico, un compromiso entre el coste y la eficacia. Para altavoces bien diseñados, la velocidad del cambio de atenuación con la frecuencia debe ser al menos suficiente para suprimir todas las irregularidades perjudiciales en la respuesta de un altavoz dentro de su banda de transmisión, causadas por el sonido procedente del otro altavoz dentro de su banda de supresión o atenuación.

Del análisis de un número relativamente grande de sistemas de altavoces se deduce la conveniencia de que las redes divisoras originen una atenuación de al menos 10 a 12 dB por octava en el punto de cruce de ambas bandas. De este modo, o con este valor, se consigue mantener una energía apreciable de baja frecuencia en las unidades de alta frecuencia, disminuyendo el efecto de las irregularidades encontradas en la curva de respuesta más allá de la gama de los conos de baja frecuencia. Estas irregularidades se producen en las proximidades de los 400 c/s. Algunas redes en uso tienen pendientes de atenuación tan suaves, que, a algunas frecuencias, las irregularidades en las curvas de respuesta exceden a las de atenuación de dichas redes. Si se consideran redes con mayor pendiente de atenuación que los valores antes indicados, no debe perderse de vista que un incremento en la atenuación lleva consigo un incremento en las pérdidas en la banda de transmisión, lo que debe evitarse siempre, pero especialmente en los sistemas reproductores de gran potencia; pues si, por ejemplo, se trata de un sistema de 100 W, una pérdida de un decibelio en la red divisora representa una pérdida de potencia de unos 25 W ($0{,}1 = \log p/100$, o sea, $p = 125$), lo cual constituye una potencia apreciable si se tiene en cuenta que el amplificador de potencia debe proporcionar entonces los 125 W en lugar de 100. Por todas estas razones y teniendo en cuenta la magnitud de las irregularidades que un altavoz produce en la banda de transmisión del otro, se ha fijado como tope máximo en la pendiente de la atenuación para las redes divisoras, el valor de 18 dB por octava [1].

En un sistema de dos canales, la frecuencia para la cual los dos sistemas de altavoces reciben igual cantidad de energía se llama *frecuencia de cruce;* en otras palabras, la frecuencia de cruce marca el punto de separación entre las dos bandas de frecuencias. En el diseño de

---

[1] La red suele diseñarse de modo que la impedancia reflejada de los altavoces, en el amplificador, sea 2,5 veces la de salida del amplificador, y las pérdidas de la red, menores que 1 dB, con el fin de utilizar totalmente la plena potencia del amplificador.

sistemas de altavoces se elije arbitrariamente un punto de cruce, como vía de ensayo, y teniendo en cuenta las características de los altavoces de la banda alta y banda baja que se van a utilizar, el coste, etc., se desplaza dicho punto de cruce de ensayo en una u otra dirección, si el sistema en su conjunto no resulta satisfactorio en su funcionamiento. Si esta frecuencia de cruce es demasiado baja, conduce a valores de los condensadores de la malla muy grandes y, por tanto, antieconómicos, y al mismo tiempo a bocinas para las altas frecuencias impracticablemente grandes. Si, por el contrario, es demasiado alta, hay el peligro de penetrar en la cresta característica que suele existir en los grandes conos, y, además, se divide la energía inicial de los sonidos de la palabra, entre las dos unidades, lo que es perjudicial para una buena *presencia* en la acción que se desarrolla en la imagen. Teniendo en cuenta estas circunstancias, se suele tomar entre los 250 y los 400 c/s. En general, una red divisora de frecuencias de dos canales consiste en dos filtros, uno de paso de altas y otro de paso de bajas frecuencias, diseñados para funcionar con un generador común en sus terminales de entrada. Para la conexión de estos filtros en sus terminales de entrada en serie o en paralelo, se requiere el conocimiento y aplicaciones de la teoría de los filtros eléctricos, que no hemos desarrollado, pero existe otro método más sencillo basado en las impedancias inversas respecto a una resistencia R_o, o método de *la resistencia constante*, de las cuales hemos hecho aplicación en el estudio de los *Igualadores y atenuadores*, y que aunque menos flexible que el otro método, nos permitirá obtener buenos resultados y tener una idea del camino a seguir en el diseño de tales redes.

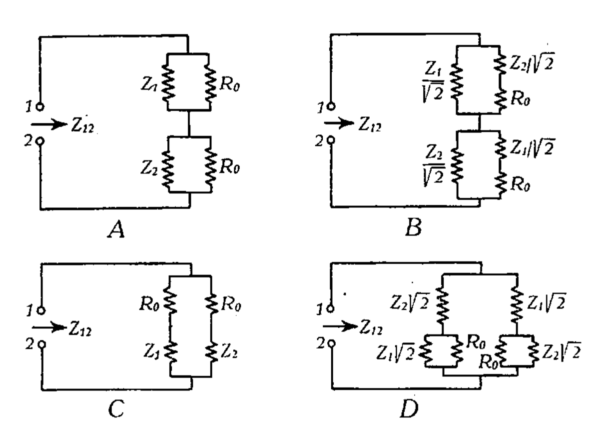


FIG. 324. Circuitos de resistencia constante

Redes divisoras de frecuencia de resistencia constante. Tales redes cumplen la condición de presentar una resistencia constante con el cambio de frecuencia, en sus terminales de entrada, siempre que se conecten en sus dos pares de terminales de salida, cargas resistivas adecuadas. Los circuitos mostrados en la figura 324, pueden servir de base para el diseño de tales redes, y en los cuales las dos impedan-

(1) Para un estudio elemental véase GOPEGUI, *Los filtros eléctricos*, dos conferencias de la C. T. N. E., Madrid.

cias Z_1 y Z_2 son inversas con respecto a R_o, en la acepción que dimos anteriormente a esta frase, es decir, cumplen la condición $Z_1 \cdot Z_2 = R_o^2$.

Para el circuito A se tiene:

$$Z_{12} = \frac{R_o\, Z_1}{R_o + Z_1} + \frac{R_o\, Z_2}{R_o + Z_2} = R_o \left[\frac{Z_1}{R_o + Z_1} + \frac{Z_2}{R_o + Z_2}\right] = R_o.$$

Para el circuito B, análogamente:

$$Z_{12} = \frac{\frac{Z_1}{\sqrt{2}}\left(R_o + \frac{Z_2}{\sqrt{2}}\right)}{R_o + \frac{Z_1}{\sqrt{2}} + \frac{Z_2}{\sqrt{2}}} + \frac{\frac{Z_2}{\sqrt{2}}\left(R_o + \frac{Z_1}{\sqrt{2}}\right)}{R_o + \frac{Z_1}{\sqrt{2}} + \frac{Z_2}{\sqrt{2}}} =$$

$$= \frac{R_o \frac{Z_1 + Z_2}{\sqrt{2}} + Z_1\, Z_2}{R_o + \frac{Z_1 + Z_2}{\sqrt{2}}} = R_o$$

Es decir, su impedancia entre los terminales 1-2 es constante e igual a R_o. Otro tanto sucede a los circuitos C y D derivados por inversión respecto a R_o de los A y B respectivamente.

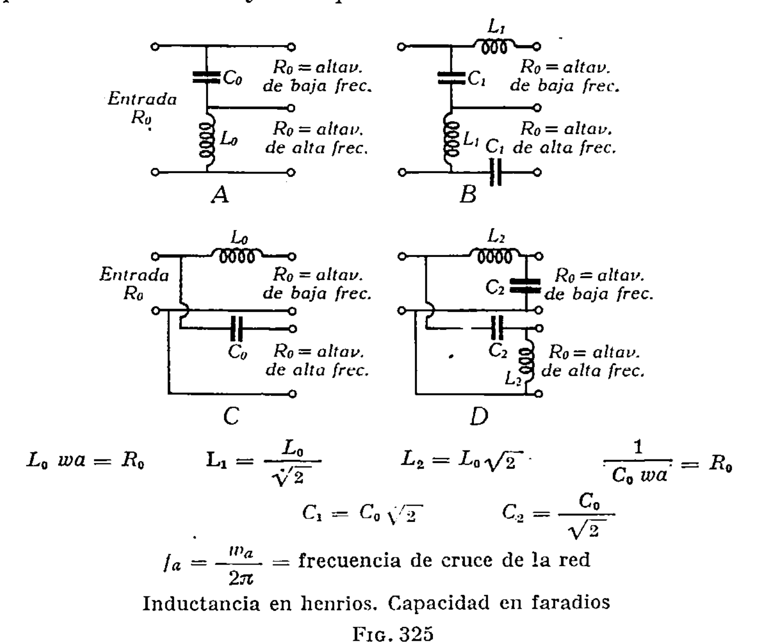


FIG. 325

Supongamos ahora los elementos reactivos Z_1 y Z_2, formados por una inductancia el primero y por una capacidad el segundo, con la

frecuencia de corte f_a; es decir, que para esta frecuencia, su reactancia toma el valor R_o, y, por tanto, se tiene:

$$L_o\,\omega_a = R_o \quad ; \quad Z_1 = j\,\omega\,L_o = j\,L_o\,\frac{\omega}{\omega_a}\,\omega_a = j\,R_o\,\frac{f}{f_a}$$

$$\frac{1}{C_o\,\omega_a} = R_o \; ; \; Z_2 = \frac{1}{j\,C_o\,\omega} = \frac{1}{j}\cdot\frac{1}{C_o\,\omega_a},\ \frac{\omega_a}{\omega} = \frac{1}{j}\,R_o\,\frac{f_a}{f}$$

de donde:

$$\frac{Z_1}{\sqrt{2}} = j\,\omega\,\frac{L_o}{\sqrt{2}} = j\,\omega\,L_1, \quad \text{o sea,} \quad L_1 = \frac{L_o}{\sqrt{2}}$$

$$Z_1\sqrt{2} = j\,\omega\,L_o\sqrt{2} = j\,\omega\,L_2 \; ; \; L_2 = L_o\sqrt{2}$$

y de un modo semejante, con:

$$C_1 = C_o\sqrt{2} \quad ; \quad C_2 = \frac{C_o}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{Z_2}{\sqrt{2}} = \frac{1}{j\,\omega\,C_1} \qquad Z_2\sqrt{2} = \frac{1}{j\,C_2\,\omega}$$

Utilizando estos valores para Z_1 y Z_2 y rehaciendo muy poco los circuitos, obtenemos los de la figura 325, en los que R_o es ahora la resistencia de los altavoces que actúa como carga. Se reconoce fácilmente

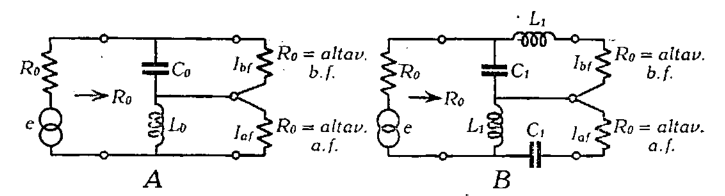


FIG. 326. Determinación de P. I.

que tales circuitos pueden ser utilizados como redes divisoras, y que la frecuencia f_a es la del punto de cruce, y, por último, que cuando su carga de altavoces es la apropiada, la impedancia en los terminales 1-2 es precisamente R_o. Nos falta ahora determinar las pérdidas de transmisión para las bandas alta y baja de los altavoces, en cada uno de esos circuitos.

Para calcular éstas, consideremos tanto el circuito A como el B cargados con sus cargas terminales antes indicadas y tal como se ve en la figura 326 y determinemos, para el A por ejemplo, los valores de la corriente en las bandas o terminales de alta y baja frecuencia:

$$I_{bf} = \frac{e}{2\,R_o}\cdot\frac{\dfrac{1}{j\,\omega\,C_o}}{R_o + \dfrac{1}{j\,\omega\,C_o}} \; ; \; I_{af} = \frac{e}{2\,R_o}\cdot\frac{j\,\omega\,L_o}{R_o + j\,\omega\,L_o}$$

las cuales pueden transformarse así:

$$I_{bf} = \frac{e}{2 R_o} \times \frac{\frac{1}{j} R_o \cdot \frac{f_a}{f}}{R_o - j R_o \frac{f_a}{f}} = \frac{e}{2 R_o} \times \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_a}}$$

o bien:

$$I_{bf} = \frac{e}{2 R_o} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_a}\right)^2}} \cdot e^{j \Phi} \quad ; \quad \Phi = \arg \left(1 - j \frac{f}{f_a}\right)$$

de igual modo:

$$I_{af} = \frac{e}{2 R_o} \times \frac{j R_o \frac{f}{f_a}}{R_o + j R_o \frac{f}{f_a}} = \frac{e}{2 R_o} \times \frac{1}{1 - j \frac{f_a}{f}} =$$

$$= \frac{e}{2 R_o} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_a}{f}\right)^2}} e^{j (\Phi + 90^\circ)}$$

cuyas expresiones nos muestran ante todo que las corrientes presentan una diferencia de fase de 90°, pero de cuyo aspecto vamos a prescindir de momento.

Como la corriente que recogerían las unidades de alta o baja, cuando se conectan separadamente al generador, vale en los dos casos;

$$I_o = \frac{e}{2 R_o}$$

las pérdidas de inserción del circuito A, para ambas unidades, valdrán:

$$PI_{bf} = 20 \log \frac{I_o}{I_{bf}} = 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_a}\right)^2} = 10 \log \left[1 + \left(\frac{f}{f_a}\right)^2\right]$$

$$PI_{af} = 20 \log \frac{I_o}{I_{af}} = 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{f_a}{f}\right)^2} = 10 \cdot \log \left[1 + \left(\frac{f_a}{f}\right)^2\right]$$

y en el punto de cruce, 3 dB.

Veamos ahora el circuito B; siguiendo igual método y con las cargas R_o y generador e en sus respectivos terminales:

$$I_{bf} = \frac{e}{2 R_o} \times \frac{\frac{1}{j C_1 \omega}}{R_o + j \omega L_1 + \frac{1}{j \omega C_1}} = \frac{e}{2 R_o} \times$$

$$\times \frac{\frac{1}{j} \cdot \frac{R_o}{\sqrt{2}} \cdot \frac{f_a}{f}}{R_o + j\frac{R_o}{\sqrt{2}} \cdot \frac{f}{f_a} - j\frac{R_o}{\sqrt{2}} \cdot \frac{f_a}{f}} = \frac{-j\frac{f_a}{f}}{\sqrt{2} + j\left(\frac{f}{f_a} - \frac{f_a}{f}\right)} \times \frac{e}{2R_o}$$

y designando con Φ el argumento de $\sqrt{2} - j\left(\frac{f}{f_a} - \frac{f_a}{f}\right)$, se tendrá:

$$I_{bf} = \frac{e}{2R_o}\sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_a}\right)^4}} \times e^{j\left(\Phi - \frac{\pi}{2}\right)}$$

y de un modo semejante:

$$I_{af} = \frac{e}{2R_o} \times \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{f_a}{f}\right)^4}}\, e^{j\left(\Phi + \frac{\pi}{2}\right)}$$

viéndose ahora que las corrientes se encuentran desfasadas 180°, en lugar de 90° como antes.

Con ello podremos determinar, como antes, las pérdidas de inserción, que valdrán:

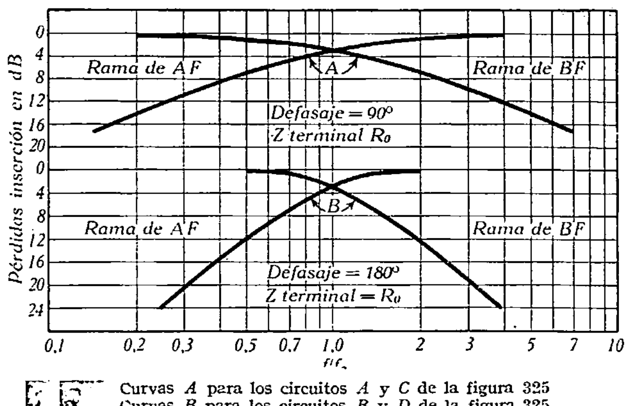
$$PI_{bf} = 20 \log \frac{I_o}{I_{bf}} = 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_a}\right)^4} = 10 \log \left[1 + \left(\frac{f}{f_a}\right)^4\right]$$

$$PI_{af} = 20 \log \frac{I_0}{I_{af}} = 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{f_a}{f}\right)^4} = 10 \log \left[1 + \left(\frac{f_a}{f}\right)^4\right]$$

Debido a las relaciones de inversión entre los circuitos *A* y *C*, las pérdidas de inserción de *A* son válidas para *C*, tal como se expresan en aquellas fórmulas, y lo mismo puede decirse para las que dan las pérdidas de *B*, que son válidas para las redes *D*.

En la figura 327 se muestran las curvas universales de pérdidas de inserción de las redes de la figura 325 en función de las frecuencias relativas f/f_a, y en ellas se ve que en la frecuencia de cruce las pérdidas son de 3 dB, es decir, coincide con la frecuencia de corte. En la característica de inserción de los circuitos *A* y *C*, es relativamente pequeño el número de decibelios por octava de su pendiente, y de aquí que estas redes se utilicen muy poco. En cambio, las de las redes *B* y *D* son tan buenas como las de la figura 328, que corresponden a una red diseñada con el auxilio de la teoría de los filtros, aunque una comparación cuidadosa muestra que estas últimas son ligeramente mejores, tanto en su banda de transmisión como en las de atenuación.

Redes tipo de filtro. Aunque no nos ocupemos de ellas, podremos decir que algunas tienen la misma estructura que la del tipo de resistencia constante, circuitos B y D, salvo que los valores de los condensadores e inductancias son algo distintos, y para cada tipo de red di-



Curvas A para los circuitos A y C de la figura 325
Curvas B para los circuitos B y D de la figura 325

FIG. 327. Características de pérdidas de inserción

fieren entre sí los dos condensadores e inductancias de cada una; es ésta una razón por la que desde el punto de vista de fabricación es más útil y sencillo la construcción de redes a resistencia constante. Bajo ciertos aspectos puede parecer ventajoso la construcción de redes de resistencia constante, debido a esta propiedad; pero es dudoso que exista tal ventaja si se tiene en cuenta que las cargas formadas por los altavoces pueden desviarse considerablemente de la carga ideal y, por tanto, pierden tal ventaja.

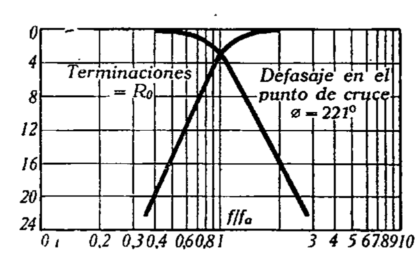


FIG. 328. Característica de atenuación de redes divisoras de frecuencia tipo filtro serie o paralelo

Aspectos constructivos y de instalación. Los métodos empleados para montar y cablear las redes divisoras de frecuencia varían considerablemente, lo que depende de las exigencias del equipo reproductor.

La práctica corriente era montar tales redes en la cabina y en las proximidades del amplificador, lo cual lleva consigo el empleo de cuatro o tres conductores, desde la cabina hasta el escenario, para llevar el sonido a cada grupo de altavoces de alta frecuencia y de baja freciencia, lo que constituye un sistema antieconómico, por lo que más modernamente se suelen montar en el escenario, con la ventaja de precisar solamente dos conductores de entrada a la red divisora de frecuencias; esto unido al empleo moderno de altavoces magnéticos

en el caso de Western, reduce notablemente los gastos de conductores de cabina a escenario, que de otro modo han llegado a ser de ocho incluyendo los de alimentación de altavoces dinámicos. En las grá-

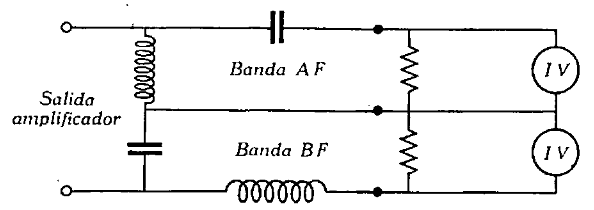


Fig. 329. Medida respuesta de una red divisora

ficas anteriores se han dado los defasajes porque esto es un dato de interés para determinar la polaridad de los altavoces y fase.

En relación con las bobinas, es conveniente dar gran importancia a su tipo y resistencia efectiva; si los núcleos son de hierro o se utiliza alguna aleación de éste, debe tenerse en cuenta no sobrecargarlas a fin de que no se produzcan modulaciones perjudiciales por alcanzar la saturación. También si la resistencia efectiva es sumamente grande, se obtendrán excesivas pérdidas en las bandas de filtro. Se ha comprobado que bobinas de gran tamaño con núcleo de aire resuelven el problema tan favorablemente como el otro sistema. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que en los cálculos de redes se supone que las

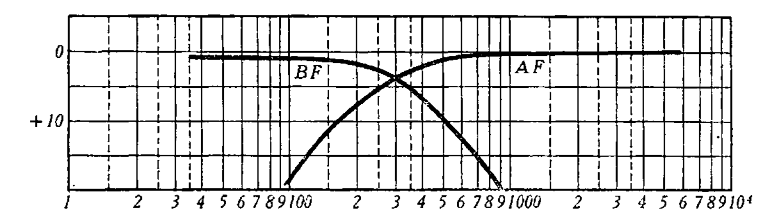


Fig. 330. Característica de una red Western

bobinas son puramente reactivas, lo que no sucede en la práctica, que siempre presentan una cierta resistencia efectiva, la que tiene por efecto desplazar la frecuencia de cruce f_a en uno u otro sentido, con relación al valor determinado por el cálculo.

Medida de las características de las redes divisoras de frecuencia. La respuesta relativa de una red divisora de frecuencias se mide o determina experimentalmente de la siguiente manera: Se coloca la red conectada al amplificador, del cual ha de recibir la energía, y se reemplazan los altavoces de carga de las dos bandas de frecuencias por resistencias equivalentes a las impedancias de dichos altavoces, para las que se ha diseñado la red. Desconectando primero la red, y conectando la resistencia de carga especificada en la salida del amplifica-

dor, se determina la respuesta de éste, con las correcciones que sean necesarias, conforme se indicó en el Capítulo XIV. Para ello, se utiliza una película calibrada en frecuencias con varias de éstas, por ejemplo, 55, 130, 300, 1000, 3000, 5000, 7000 y 8000 c/s, y un indicador de volumen calibrado en decibelios para 500 Ω. Después se conecta la red en lugar de la carga artificial del amplificador, con sus dos cargas resistivas artificiales antes mencionadas, y se conecta el indicador de volumen a través de los terminales de baja frecuencia (fig. 329), haciendo las lecturas para las distintas frecuencias ya indicadas, cuyas lecturas restadas de las correspondientes del amplificador, nos darán la respuesta relativa de la banda de baja frecuencia de la red. Se conmuta el indicador de volumen a los terminales de alta frecuencia de la red, y se vuelven a repetir las lecturas para las distintas frecuencias restándolas de las correspondientes del amplificador, como antes; esto nos dará la respuesta de la banda de altas frecuencias de la red divisora. Si la frecuencia de cruce es, por ejemplo, $f_a = 300$ c/s, cada sección debe dar una atenuación de 12 dB por octava (si es éste el valor especificado para su atenuación). Esto quiere decir, que en los terminales de baja frecuencia debe haber 12 dB de caída de los 300 a los 600 c/s, y en los terminales de alta frecuencia debe haber otros 12 dB de caída al pasar de los 300 a los 150 c/s. En una red eficaz de este tipo, las pérdidas mínimas en el punto o frecuencia de cruce f_a no deben ser inferiores a 3 dB, y usualmente son de 3,5 dB aproximadamente. Así, por ejemplo, para la red de la figura 330 en la banda de alta frecuencia se tendría:

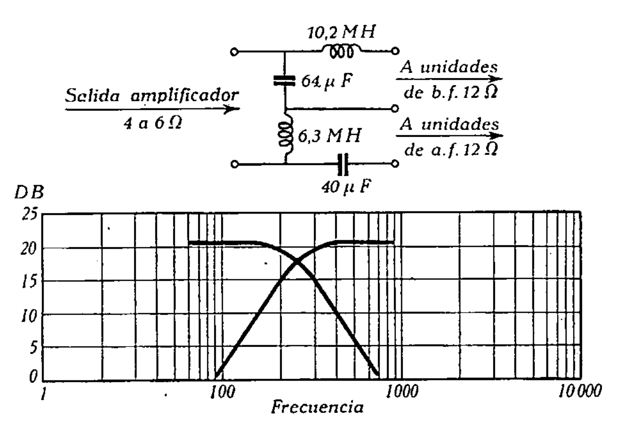


Fig. 331. Red divisora tipo serie para el sistema de altavoces Shearer

Frecuencias	55	130	300	1000	3000	5000	7000	8000
Lect. amplificador.	8	10	12	13	10,5	7,5	—1	—6
Lecturas alta frec.	—	—4	9	12,5	10,5	7,5	—1	—6
Pérdidas inserción.	—	14	3	0,5	0	0	0	0

(1) Modernamente se utilizan también las frecuencias 30, 55, 130, 300, 500, 1000, 3000, 5000, 7000, 8000, 10 000 y 12 000 c/s.

Para la banda de baja frecuencia:

Frecuencias	55	130	300	1000	3000	5000	7000	8000
Lect. amplificador. Lecturas baja frec.	8 7,5	10 9	12 8	13 —7,5	10,5 —	7,5 —	—1 —	—6 —
Pérdidas inserción.	0,5	1	4	20,5	—	—	—	—

La figura 331 muestra la constitución y características de una red divisora utilizada en conexión con un tipo moderno de altavoces de que hablaremos en el capítulo siguiente.

Líneas de transmisión

La energía sonora que bajo la forma de una corriente alterna más o menos compleja se obtiene en el circuito de placa del amplificador de potencia, debe transmitirse a los altavoces, bien directamente, como sucede a veces con el altavoz monitor o de cabina, que sirve para que el operador se dé cuenta del sonido que está radiando en la sala, bien por una serie de elementos de acoplamiento, hasta llegar al escenario, donde se encuentran localizados dichos altavoces.

Estos elementos de acoplamiento, entre los cuales destaca una línea formada por dos conductores, deben cumplir además de otros requisitos propios de su función, el de transmitir esa energía que corresponde a frecuencias entre 50 y 8000 c/s, con las menores pérdidas posibles, y con la menor deformación o discriminación de frecuencias; quiere esto decir que todas esas frecuencias habrán de ser atenuadas por igual, y en la menor proporción posible, o, en todo caso, con una deformación inferior a un cierto límite previamente establecido.

Aun extendiendo la gama de audiofrecuencias hasta los 15 000 c/s, todas las frecuencias a transmitir son relativamente bajas, y la longitud de las líneas de transmisión utilizadas en reproducción sonora es suficientemente corta para que sea lícito no tener en cuenta todos los fenómenos de resonancia, ondas estacionarias, impedancia característica de la línea, etc., que se realizan en el estudio en telefonía y alta frecuencia y que aquí no se originan en medida apreciable por aquellas dos circunstancias, y solamente tendrá interés estudiar los efectos de capacidad y resistencia, en estas líneas que llamaremos *cortas:* el primero por la deformación en frecuencia que produce y en vista de limitar ésta, y el segundo por las pérdidas que se producen por efecto térmico en la línea, que no contribuyen en modo alguno a excitar los altavoces, y que conducen a una limitación en la longitud de dicha línea, si se quiere que tales pérdidas no excedan de un valor conveniente. Podremos, pues, considerar una línea corta como formada por dos

conductores de una cierta longitud en los cuales se haya uniformemente repartida una resistencia, la que será, por tanto, proporcional a la longitud, una inductancia, que goza de idéntica propiedad, si bien su coeficiente de proporcionalidad es mucho menor, y una capacidad también uniformemente repartida igual que las anteriores, pero que, al contrario de ellas, se encuentra en derivación entre las dos líneas; esta capacidad se origina por la presencia de los dos conductores entre sí, y por la que originan éstos con tierra.

Se comprende sin más, e intuitivamente, que siendo la línea en cierto modo, asimilable al circuito mostrado en la figura 332, a medida que aumenta la frecuencia, aumenta la resistencia aparente de la línea,

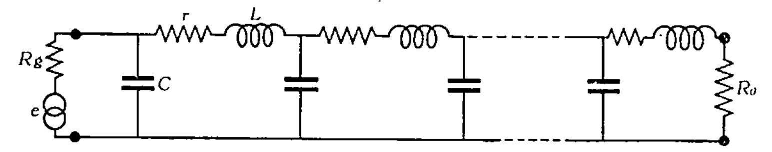


Fig. 332. Circuito equivalente a una línea de transmisión

originando una mayor dificultad en el paso de la corriente a lo largo de los conductores, desde la salida del amplificador al altavoz; por otra parte, los condensadores parciales van derivando sucesivamente una fracción de corriente entre ambas líneas o entre éstas y tierra, ya que al aumentar la frecuencia se reduce su impedancia al paso de la corriente, y el resultado de ambos efectos concordantes es que si la línea es de relativa longitud, las frecuencias altas pueden no llegar a alcanzar los altavoces, por haberse quedado en el camino, con la consiguiente deformación del sonido; en realidad, dentro de la gama de frecuencias en que nos vamos a mover y de la longitud relativa de las líneas que vamos a utilizar, se puede anticipar que sólo los efectos de capacidad valen la pena de tomarlos en cuenta, ya que la autoinducción, por su extraordinaria pequeñez, según dijimos antes, no tiene apenas influencia. Se comprende también que un igualador formado por una capacidad en serie con la línea y una autoinducción en paralelo con la misma y de valores convenientemente calculados, conforme se indicó en el Capítulo XVI de *Igualadores*, podrá compensar esa deformación cuando sea excesiva, y en principio éste es el resultado que se consigue en telefonía con las líneas llamadas *cargadas*, si bien los fenómenos que allí se consideran son algo más complejos. No obstante, en líneas cortas, raramente se acude al uso del igualador, ya que es relativamente fácil mantener esa discriminación de frecuencias dentro de límites estrechos, mediante otros recursos de que nos vamos a ocupar, y que son mucho más simples.

Para estudiar la influencia de todos esos factores, hay que relacionarlos, de una parte, con la tensión aplicada a la entrada de la línea, y la corriente que circula por ella; de otra, con las impedancias terminales, o impedancias con las cuales ha de quedar cargada la línea;

y hasta cierto punto, la elección de la tensión y corriente antes citadas, es decir, sus valores eficaces, dependen de los valores asignados a tales impedancias.

Estas impedancias terminales son, de una parte, la resistencia R_o de la bobina móvil del altavoz, o la combinada de las bobinas cuando existe más de uno, y en el caso de emplear red divisora de frecuencias, la impedancia de entrada de dicha red; de la otra parte, la impedancia de salida del amplificador de potencia R_g, la cual, cuando la línea se acopla directamente al amplificador, está constituída por la resistencia interna de las válvulas finales R_i combinadas según la disposición de dichas válvulas, o por la impedancia reflejada en el secundario

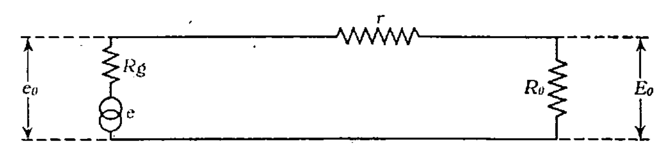


FIG. 333. Circuito equivalente a una línea eléctrica corta, prescindiendo de los efectos de capacidad y autoinducción

del transformador de salida (cuando el acoplamiento de la línea se haga a través de uno de éstos) por aquella R_i, de cuyo funcionamiento ya nos hemos ocupado en otro lugar (Capítulo XV). Algunas veces, cuando hay varias líneas con otros tantos grupos o sistemas de altavoces, se precisa tener en la cabina un sistema de regulación de nivel o volumen sonoro para cada altavoz o grupo de altavoces, y entonces se intercala entre ese transformador de salida y la línea, el llamado *panel de salida o regulación de volumen*, y habrá que tomar en cuenta las características de éste para el cálculo de la R_g correspondiente a cada línea y las potencias entregadas por ese panel sobre cada una de aquéllas ([1]). En todo caso, el problema se simplifica notablemente, como reiteradas veces hemos indicado, suponiendo tanto R_g como R_o resistivas, si bien, como veremos más adelante y en lo que se refiere a esta última, sólo es cierto en una medida muy relativa. Cuando se trata de evaluar relaciones energéticas, o de potencia, no debe perderse de vista que los transformadores disipan siempre una cierta cantidad de energía y que su rendimiento no suele exceder casi nunca del 85 al 90 %.

Influencia de la resistencia de la línea; condiciones óptimas. Imaginemos ahora, prescindiendo de los efectos de capacidad, el circuito de la línea reducido al de la figura 333, en el que r representa la resis-

([1]) En el estudio somero que vamos a hacer aquí, indispensable para los sistemas de reproducción, no cabe más que dar ligeras ideas sobre la distribución de energía entre varios altavoces; para más amplios detalles con referencia a audiodistribución, véase nuestro trabajo *Equipos de baja frecuencia.*

tencia total de la línea con sus dos hilos de ida y vuelta, en cada uno de los cuales hay una resistencia del hilo igual a $r/2$; e_c será la tensión desarrollada en el circuito de placa, y e la tensión aplicada a la entrada de la línea; después de lo dicho en el Capítulo XIV, las condiciones óptimas de transferencia de energía a la línea se realizarán cuando

$$R_g = r + R_o;$$

ahora bien, la tensión e_o se reparte entre la resistencia de línea y la carga, y la tensión que en los extremos de ésta se recoge tiene por valor:

$$E_o = \frac{e \cdot R_o}{R_o + r} = e_o \frac{1}{1 + r/R_o} = e_o \eta$$

y la pérdida en la línea,

$$P = e_o - E_o = e_o \frac{r}{r + R_o}$$

este factor η da la *eficacia o rendimiento de la distribución* de energía entre la línea y la carga, así:

para $r = R_o$ $\eta = 50$ % para $R_o = 3\,r$ $\eta = 75$ %
para $R_o = 4\,r$ $\eta = 80$ » para $R_o = 19\,r$ $\eta = 95$ »

y de aquí se deduce inmediatamente que si queremos obtener la máxima energía en la carga R_o habremos de procurar que η sea lo mayor posible, es decir, hemos de buscar que la *resistencia de la línea r sea lo más pequeña posible frente a la carga* R_o. Puesto que independientemente de otros factores que estudiamos a continuación r crece proporcionalmente a la longitud l de la línea, resultará que para una carga dada R_o, y para un determinado rendimiento η, hay un límite en la longitud de la línea, de constantes por metro también dadas. Otra consecuencia inmediata que se deduce de la conclusión anterior es que siendo r muy pequeña frente a R_o, podremos prescindir de ella sin gran error, en la condición óptima de transferencia de energía, y ésta se convertirá en la

$$R_g = R_o,$$

la cual nos dice que las dos impedancias terminales con las que aparece cargada la línea deben ser iguales.

Medios de mejorar el rendimiento de la línea. Examinando la expresión del rendimiento, nos encontramos con dos medios de aumentarlo en la medida posible: o bien aumentando la sección del conductor que constituye la línea, con lo cual r disminuye notablemente, o haciendo R_o mayor mediante el empleo de transformadores; ello nos da dos modos de distribución de la energía, que son conocidos también

en la distribución de energía eléctrica para fines industriales: la distribución a *baja tensión* y corriente fuerte, y la de *alta tensión* y corriente débil. Desde luego, se comprende que el primer sistema presenta una gran desventaja desde el punto de vista económico, y es que exigiendo más cobre por tener mayor sección la línea, es mucho más caro que el otro, si bien en algunos casos este defecto queda compensado por el gasto de los transformadores que se requiere en el otro sistema y tiene además la ventaja de que la corriente transportada por la línea, por ser muy intensa, es difícilmente perturbada por ningún agente exterior, cosa que no sucede a menudo en el caso de la alta tensión. En el sistema de alta tensión, y dado que la resistencia de la bobina móvil de un altavoz no excede corrientemente de unos 23 Ω en los altavoces electrodinámicos, que son casi exclusivamente empleados en cine sonoro, se utiliza al final de la línea un transformador que generalmente acompaña al motor o receptor del altavoz, y que nos da sobre el devanado conectado a la línea, una impedancia reflejada de R_o, estando conectada la línea al otro extremo a una resistencia de valor sensiblemente igual a R_g. De este modo, y si como es corriente con esta clase de altavoces, la línea lleva a la entrada un transformador para rebajar la impedancia de las válvulas R_i a un cierto valor, que más adelante indicaremos R_g, esta línea de trans-

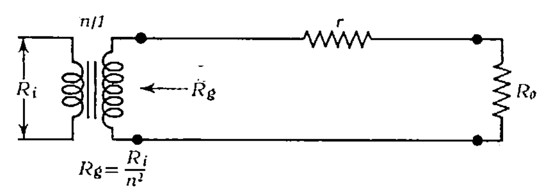


FIG. 334. Línea de baja impedancia con adaptación de Z_{12} a R_o

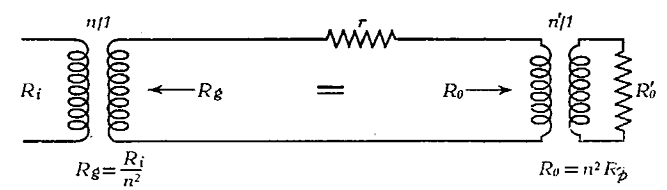


FIG. 335. Línea de alta impedancia con transformadores de equilibrio para que $Rg = R_0 \gg r$

misión estará constituída según se ve en la figura 334. En definitiva, bien directamente o bien mediante el concurso de transformadores convenientemente elegidos, se pueden lograr los dos resultados indispensables para obtener un buen rendimiento en este sistema de alta tensión: *igualar las dos impedancias terminales reflejadas en la línea* $R_g = R_o$, *y hacer que ambos valores sean suficientemente altos frente a r para que las pérdidas en la línea sean muy pequeñas o, lo que es lo mismo, el rendimiento* η *sea elevado*. Conviene, no obstante, elegir R_g, no tan excesivamente grande que la corriente en la línea sea tan débil, como para ser perturbada por cualquier inducción ex-

traña, la cual, aun siendo débil, pueda llegar al final de aquélla con un valor superior al de la señal que se desea transmitir (fig. 335).

Obsérvese, además, que en este sistema, si conocemos la potencia de salida del amplificador W, dar la impedancia de entrada en la línea R_g equivale a señalar la tensión de entrada en la línea, ya que entre ambas existe la relación

$$W = \frac{e^2}{R_g}; \text{ de donde } e = \sqrt{R_g \cdot W}$$

Por ejemplo, supongamos un amplificador de 10 W de salida y con una impedancia de salida de 100 Ω, que es el valor de R_g (lo cual equivale a suponer que la eficiencia del transformador de entrada en la línea es del 100 %; si fuera sólo el 75 %, aquellos 10 W quedarían reducidos al entrar en la línea o sobre su secundario a 7,5 W); esta resistencia es razonablemente alta, a fin de impedir los efectos de capacidad y pérdidas de aislamiento de que hablaremos después. La tensión en la línea será, pues,

$$e = \sqrt{10 \cdot 100} \doteq 31{,}6 \text{ V};$$

si utilizamos una línea de 183 m de hilo de 1/0,044 (véase tabla al final), para resistencia de la línea, tenemos: $r = 6{,}32\ \Omega$. Aunque podemos incluir esta resistencia en el cálculo de la relación de transformación del transformador de altavoces, puede omitirse sin grave error, dada su pequeñez. Si al final de la línea se van a asociar cuatro altavoces conectados en paralelo de $R_L = 10\ \Omega$ para cada bobina móvil, su impedancia combinada será 10/4 que es el valor real de R_o para nuestra línea, y, por tanto, puesto que R_g vale 100 Ω, la relación de transformación será:

$$n^2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \frac{R_g}{R_o} \quad ; \; n = \sqrt{\frac{100}{10/4}} = \sqrt{\frac{400}{10}} = 6{,}33 \text{ aprox.};$$

la eficiencia o rendimiento de la línea será:

$$\eta = \frac{n^2 R_o}{n^2 R_o + 6{,}32} \times 100 = \frac{100}{100 + 6{,}32} \times 100 = 94\ \% \text{ aprox.},$$

bastante aceptable, y si el transformador citado tiene un rendimiento del 75 %, el rendimiento de línea y transformador será el

$$75 \text{ del } 94\ \% = 70{,}5\ \%;$$

es decir, de los 10 W, los altavoces reciben 7,05 W. Si hubiéramos tenido en cuenta el rendimiento del transformador de entrada en la línea, los altavoces sólo hubieran recogido el 70,5 % de los 7,5 W, o sea 5,29 W

Un rendimiento combinado de línea y transformador de altavoces de un 67 %, se admite muchas veces como tolerable.

El sistema de alta tensión presenta, no obstante su flexibilidad, algunas desventajas que vamos a enumerar y que conviene no perder de vista; en primer lugar, los transformadores colocados al final de la línea o de equilibrio de altavoces tienen el devanado conectado a la línea, de hilo muy fino, lo que supone un precio relativamente elevado de su fabricación, una mayor posibilidad en la frecuencia de averías en ellos y mayores pérdidas en el transformador, o sea, menor rendimiento de éste, debido a la mayor capacidad repartida en los devanados. En segundo lugar, las relativamente altas impedancias de entrada en la línea originan altas tensiones, que deben ser soportadas por la línea y los devanados, lo cual exige un mejor aislamiento en ambos; además, el efecto de pérdida [1] en la línea es más serio que con bajas impedancias terminales, ya que, por ejemplo, una pérdida de 10 000 Ω en la línea no tiene importancia con impedancias terminales de 100 Ω, pero representa una y muy seria si aquellas terminales son de 5000 Ω. Finalmente, los efectos de capacidad de la línea son, como vamos a ver después, tanto más acentuados cuanto mayor sea el valor de las impedancias terminales. Todos estos factores limitan, pues, el valor de esas impedancias a ciertos valores prácticos que no suelen exceder casi nunca de los 600 Ω.

Líneas de alta y baja impedancia. Los dos sistemas de transmsiión de que hemos hablado nos llevan como de la mano a la distinción entre líneas de baja y alta impedancia, y teniendo en cuenta los efectos de capacidad de la línea, a la justificación de los valores tan frecuentemente encontrados en la práctica de impedancias terminales de 50, 200, 250, 500 y 600 Ω, que el lector encontrará a menudo en las características de muchos equipos comerciales, ya sea de reproducción sonora, ya de audiodistribución, o de estudios de radiodifusión, y que en la mayoría de los casos sugiere la pregunta de por qué se han adoptado estos valores precisos y no otros distintos. En realidad, la elección de esos valores no obedece más que a un compromiso, entre los factores de que acabamos hacer mención, en las líneas de alta impedancia y las pérdidas de capacidad, el coste de los cables, etc.

Es también importante observar que las denominaciones de líneas de alta y baja impedancia son frases poco felices, ya que en realidad, como acabamos de ver, si se refieren a la resistencia de la línea, ésta es siempre de valor tan pequeño, como para no ser tenido en cuenta en la cuestión rendimiento de la línea; la denominación se refiere exclusivamente a las *impedancias terminales* entre las cuales trabaja la línea y que hemos designado por R_g y R_o, o más bien a las características de la transmisión de la energía a lo largo de la línea en uno y otro caso: para las líneas de alta impedancia, es decir, con valores relativa-

[1] O resistencia de aislamiento.

mente grandes de R_g y R_o, la transmisión se hace en alta tensión, mientras que en líneas de baja impedancia, o sea, para valores pequeños de ambas impedancias, la transmisión se hace a baja tensión. Las impedancias terminales de menos de un ohmio a 32 Ω se consideran generalmente como bajas impedancias en audiofrecuencia, mientras que impedancias entre 50 y 600 Ω se consideran como impedancias altas; las llamadas *líneas de bobina móvil*, porque una o más bobinas móviles de altavoces van conectadas directamente a la línea sin el concurso de transformadores, se consideran también como líneas de baja impedancia.

Generalmente se considera tolerable una pérdida de un 15 % de potencia en líneas de baja impedancia y la Tabla I muestra la máxima longitud de línea que puede conectarse a impedancias corrientes de bobina móvil sin exceder esa cifra. (Líneas de alta impedancia implican el uso de transformador que tiene en sí mismo pérdidas, y, por consiguiente, para tales líneas, la pérdida se limita al 5 %, para tener una buena economía de potencia.)

TABLA I. **Máxima longitud de línea de baja impedancia en m con un 15 % de pérdida de potencia en la línea, en conexión con impedancias corrientes de bobina móvil, la longitud es la distancia medida en la línea, del amplificador a la carga**

Calibre del hilo AWG (B & S)	Impedancia de carga en ohmios							
	2	4	6	8	10	16	32	50
10	45,65	91,20	137,15	183,00	228,60	336,00	732,50	1143,50
12	28,96	57,95	86,93	115,00	144,86	231,65	463,60	719,80
14	18,24	36,60	54,90	73,20	91,20	144,86	289,60	456,00
16	11,50	22,86	34,46	45,65	57,95	91,20	183,00	289,60
18	7,02	14,33	21,35	28,96	36,00	58,00	115,00	180,00
20	4,56	9,12	13,68	18,24	22,86	36,00	72,00	114,00
22	2,75	5,50	8,54	11,28	14,33	22,86	45,65	70,20

Examinando la tabla se ve que solamente líneas relativamente cortas son tolerables con impedancias muy bajas y que frecuentemente se precisa el mayor diámetro de hilo; a medida que aumenta la impedancia, se puede emplear menor diámetro de hilo y mayor longitud. Empleando una más corta longitud de la línea que la máxima tolerable en la tabla, se reduce proporcionalmente la pérdida en la línea.

En tanto que es deseable trabajar con líneas de alta impedancia para mantener las pérdidas en la línea a un nivel muy bajo, la capacitancia de la línea, despreciable con las bobinas móviles, comienza a tomar importancia cuando la impedancia de carga aumenta. La capacidad de una línea bifilar está en *shunt* con los altavoces y actúa reduciendo el voltaje a las altas frecuencias, según dijimos ya. Ambos efectos son tomados en cuenta en el diagrama de diseño que daremos después para líneas de alta impedancia.

Vamos a estudiar por separado los efectos de la resistencia de la línea y la capacidad para ver su influencia en la respuesta de la línea.

Efectos de la resistencia de línea sobre la respuesta de la misma. Todo cuanto llevamos dicho hasta ahora supone una impedancia terminal de los altavoces R_o puramente resistiva, y prescindiendo, de momento, de los efectos de capacidad, hemos visto que la tensión en la línea valía

$$E_o = \frac{e_o R_o}{R_o + r}$$

de modo que la expresión de pérdida de energía por la inserción de la línea, expresada en decibelios, vale

$$PI_{d_B} = -20 \log \frac{e_o}{E_o} \sqrt{\frac{R_o}{R_o + r}} = -10 - \log \left(1 + \frac{r}{R_o}\right)$$

la cual será constante para todas las frecuencias a condición de que lo sea también R_o. Pero precisamente, como veremos al hablar de los altavoces, éstos no presentan una impedancia resistiva; es decir, su impedancia nominal R_o suele ser la impedancia que toman para las proximidades de los 400 c/s, y la característica de esta impedancia frente a las frecuencias audibles presenta el aspecto señalado en la figura 336. En definitiva, el término R_o que aparece en la última expresión anterior no será constante y, por tanto, el número de decibelios de la misma será variable con la frecuencia, con el resultado de una pequeña deformación en frecuencias en el sonido reproducido por el altavoz.

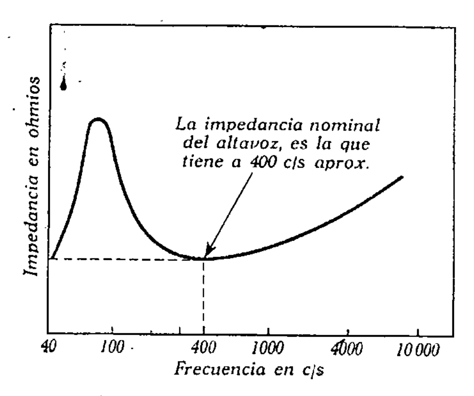


FIG. 336. Característica de impedancia de un altavoz de bobina móvil (Jensen)

Efecto de la capacidad de la línea. Hemos repetido varias veces, anteriormente, que la capacidad repartida de la línea actúa como si se encontrase en paralelo entre los dos conductores y que su efecto deformante crece a medida que aumenta la frecuencia de la corriente, de tal modo que si la línea es suficientemente larga, puede llegar un momento en que las frecuencias más elevadas no alcancen siquiera los altavoces. Cuando se utiliza, como sucede en las instalaciones permanentes, cable bajo plomo, o conductores de cobre con aislamiento de goma encerrados en tubo de hierro, y la longitud de la línea es de consideración, puede tenerse una capacidad repartida total de 0,01 mi-

(1) Teniendo en cuenta el factor de corrección, página 366.

crofaradios, la cual a una frecuencia de 7000 c/s presenta una impedancia de 2000 Ω; si, por ejemplo, los transformadores de altavoces están diseñados para una impedancia de línea de 5000 Ω, es evidente que aquellos 2000 Ω de la capacidad representan una impedancia muy pequeña frente a estos 5000, y una gran parte de la corriente de 7000 c/s se derivará por esa capacidad y no alcanzará los altavoces; el resultado será un gran debilitamiento en las frecuencias de 7000 c/s que forman parte del sonido y de todas las superiores, con una falta de *brillantez* en el mismo. Esta capacidad repartida puede evaluarse, por término medio, en unos 50 picofaradios por pie (30 cm) de cable, y para que el lector tenga una idea de las constantes de alguna línea corta, indicaremos que con cable flexible del utilizado para el alumbrado tipo 23/0,0076, que se emplea a menudo en instalaciones portátiles o volantes, estas constantes son, para cada 1600 m de flexible: resistencia 87 Ω, in-

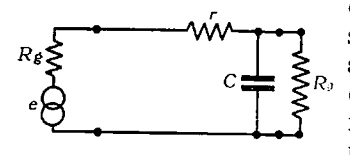


FIG. 337. Circuito equivalente para el efecto de capacidad en la línea. Pérdidas = 10 log. $[1 + (f/f_c)^2]$

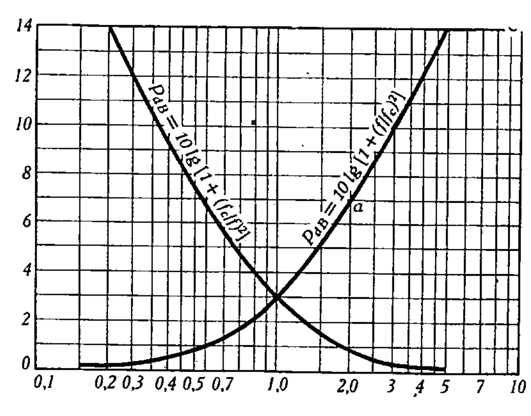


FIG. 338

ductancia 1,3 mH, capacidad 0,075 F, y perditancia 150 mhos; con estas constantes puede aceptarse como línea corta una de 275 m con una pérdida a 10 000 c/s todavía aceptable, es decir, 3 dB por debajo de la que se produce sin intervención del efecto de capacidad, la cual, para tal longitud en que prácticamente no interviene el efecto de la inductancia se limita en un 12 por ciento, siendo el valor más apropiado de la impedancia de línea, para esa longitud máxima, de 200 Ω.

El estudio del efecto de capacidad de la línea puede hacerse (fig. 337) por el mismo sistema que hemos calculado el acoplamiento a resistencias en el caso de altas frecuencias, y huelga volverlo a repetir aquí, dando solamente el resultado, que fácilmente puede establecer el lector:

$$E_o' = \frac{E_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{X_c}\right)^2}} = \frac{E_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

$$\text{con } R = \frac{R_g R_o}{R_g + R_o} \quad ; \quad X_c = \frac{1}{C\omega} \quad ; \quad \frac{1}{2\pi f_c C} = R$$

aquí, como entonces f_c es la frecuencia de corte, es decir, aquella para la cual la reducción de tensión E_o' con relación a la máxima en la carga R_o es de 3 dB. De esta forma, y teniendo en cuenta la expresión de la pérdida uniforme que dimos antes motivada por la resistencia de la línea, las pérdidas totales, teniendo en cuenta el efecto de capacidad, pueden expresarse así:

$$P_{dB} = 10 \log\left(1 + \frac{r}{R_o}\right) + 10 \log\left[1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right]$$

$$\boxed{P_{dB} = 10 \log\left(1 + \frac{r}{R_o}\right)\cdot\left[1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)\right]}$$

Una curva universal para la evaluación de este término variable con f, se encuentra representada en la figura 338 (a), y para el primero, ya obtuvimos otra en el Capítulo XIV (fig. 276) sin más que reducir sus ordenadas en $\frac{1}{2}$.

Para darnos una idea de la influencia de este último término, supongamos, por ejemplo, $R_g = R_o = 10^6\ \Omega$, con lo que $R = 500\,000\ \Omega$, y que para una frecuencia $f = 10\,000$ c/s, sea $X_c = 500\,000\ \Omega$; entonces:

$$P_{dB} = 3 \text{ dB};$$

en cambio, este mismo término, para una frecuencia de 3333 c/s, contribuye a las pérdidas con $10 \cdot \log 0{,}95 = 0{,}5$ dB.

Pero si en lugar de ello consideramos para $R_g = R_o = 500\ \Omega$, el término anterior, es decir, la raíz, vale ya para los 10 000 c/s,

$$\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2000}\right)^2} \simeq 1;$$

de modo que a la frecuencia más elevada no hay prácticamente atenuación, por efecto de la capacidad.

¿Cuál será, pues, el valor más conveniente teniendo en cuenta estos efectos de capacidad, para las impedancias terminales? O más

concretamente: dada una determinada frecuencia límite superior, para la que deseamos que los efectos de capacidad produzcan una pérdida prefijada, ¿cuál es el valor que deben tomar esas impedancias terminales, supuesta conocida la capacidad de la línea? Para concretar más el problema vamos a admitir, lo que es el caso corriente, que las pérdidas tolerables por efecto de capacidad a la frecuencia máxima a transmitir, no deben exceder de 3 dB, con lo cual tal frecuencia tope se convierte en la frecuencia de corte, y la transmisión será buena o con pérdidas por capacidad inferiores a 3 dB para toda la gama de frecuencias inferiores a tal frecuencia de corte.

Hemos visto que desde el punto de vista del rendimiento de la línea, el valor de R_o debe ser lo mayor posible; pero, por otra parte, la condición para que la frecuencia preasignada sea la frecuencia de corte exige que la ecuación

$$\frac{1}{2\pi f_c C} = \frac{R_o R_g}{R_o + R_g}$$

sea satisfecha para tal frecuencia, donde C es la capacidad de la línea; ahora bien, la condición de máxima transferencia exige que $R_g = R_o$; luego la última expresión da:

$$\frac{1}{2\pi f_c C} = \frac{R_o}{2} \quad ; \quad \boxed{R_o \cdot f_c = \frac{1}{\pi C}}$$

como valor máximo compatible con ambas condiciones; se ve, pues, que cada línea tiene un valor óptimo para la impedancia terminal R_o, el cual no debe ser sobrepasado, si bien pueden tomarse valores inferiores a él, pero a costa de reducir el rendimiento de la línea ([1]). Los valores antes mencionados de 250, 500, 600 etc., de los equipos comerciales, no son más que el resultado del compromiso entre una reducción en las pérdidas por capacidad (para líneas usuales) al valor de 3 dB, para una determinada frecuencia tope superior del espectro a transmitir, y la condición de que las pérdidas uniformes de la línea, por razón de su resistencia propia, se reduzcan a un 10 ó un 15 %; y es teniendo en cuenta ambas circunstancias cómo se han trazado las curvas del diagrama de la figura 339, para las líneas de alta impedancia.

Transformadores de equilibrio de impedancias. Volviendo a los transformadores conectados en los extremos de la línea, y refiriéndonos exclusivamente al del lado de la carga o conectado entre el final de línea y el altavoz o grupo de altavoces, hemos supuesto que la

([1]) Se ve también que cuanto mayor sea f_c, menor deberá ser R_o, pues ambas son inversamente proporcionales, para una línea dada.

relación de transformación del mismo era la conveniente para que se cumpla la condición ideal $R_g = R_o$, y sabemos que cuando se cumple esta condición ideal, se obtiene la máxima transferencia de energía a la línea. En la práctica, sin embargo, no siempre es posible encontrar a mano transformadores para los altavoces, y transformadores de salida para amplificadores, diseñados para cada instalación particular, sobre todo cuando no se trata de instalaciones tipo o normales como las construídas por grandes firmas, en que se procura satisfacer tal condición. En otro caso, nos encontramos en la necesidad de buscar el mejor equilibrio posible con los transformadores standard o normales que se encuentran en el comercio.

Supongamos, para tomar un ejemplo específico, que la impedancia de salida del amplificador se ha fijado en 200 Ω, y que los altavoces que vamos a utilizar van provistos de transformadores de final de línea de relaciones, o con tomas de valores: 14/1, 18/1 y 22/1 y bobinas móviles de 7,5 Ω; si hay diez altavoces y deben conectarse en paralelo, la relación de transformación buscada debe ser

$$n = \sqrt{\frac{200}{7{,}5/10}} = \sqrt{262} = 16{,}4$$

Como esta relación no está entre las que tienen los transformadores, podremos elegir la 14/1, con lo que la impedancia reflejada en la línea por cada uno será $7{,}5 \times 14^2 = 1480\ \Omega$ aproximadamente, y para los 10 en paralelo 148 Ω, que deben equilibrar a los 200 del amplificador. En realidad, la impedancia que equilibra los 200 Ω será ligeramente mayor, debido a la resistencia de la línea y a la de los devanados de los transformadores, pongamos por ejemplo 160 Ω. Tales serían las condiciones de trabajo de un amplificador con un tríodo de salida o para un *push-pull* clase A; pero las condiciones son más críticas para un paso de salida clase AB o para un clase B en contrafase (y mucho más si utilizan pentodos de salida cuya carga, como vimos, es muy crítica), si se quiere evitar pérdidas de energía y deformación consiguiente. En tal caso, y por extensión en todos, *será siempre preferible, según indicamos en el Capítulo XIV, elegir una impedancia de carga ligeramente superior a la impedancia de entrada de línea, que la inmediatamente inferior a esta última.*

Deberíamos, pues, en el ejemplo anterior, emplear ventajosamente la relación 18/1, lo que da para impedancia de carga 244 Ω, ligeramente superior a la de salida del amplificador.

Diagrama para el diseño de líneas de transmisión eficientes con sistemas de altavoces (alta impedancia). La figura 339 ha sido preparada para resolver problemas en líneas de alta impedancia. Los factores a tomar en cuenta incluyen la impedancia terminal de la línea, longitud de la línea, diámetro de hilo, frecuencia límite superior, capacidad de la línea y característica impedancia-frecuencia del alta-

voz. Para simplificar el problema, la capacidad de la línea es supuesta constante e independiente del diámetro del conductor y se ha fijado en 50 mmfd por pie. Se supone una característica impedancia-frecuencia creciente típica en los altavoces corrientes. Estos factores condu-

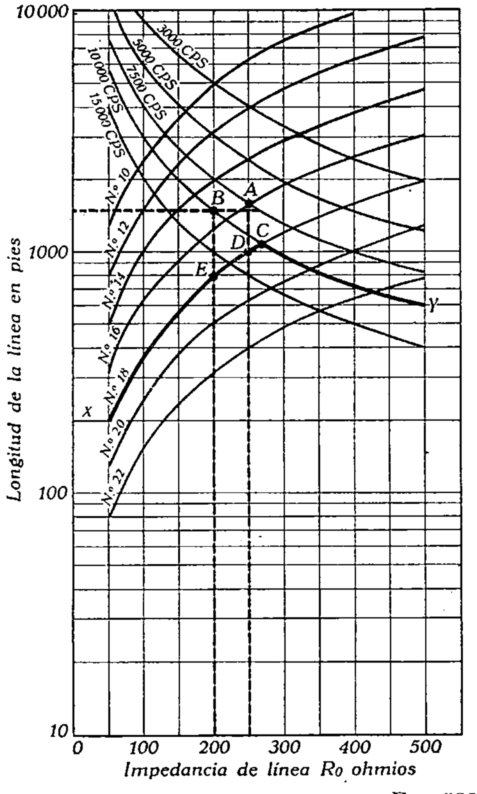


FIG. 339

Diagrama de diseño de líneas de transmisión

Basada en una pérdida en la línea del 5 % de la potencia y 3 dB a la frecuencia límite superior debido a una capacidad de línea de 50 picofaradios por pie, y a través de bobina móvil típica de altavoz.

NOTA.—Si se utiliza un calibre de hilo distinto del indicado en el diagrama, las pérdidas de línea serán como sigue:

	Pérdidas en %
Calibres mayores	
Calibres del hilo	
Tres números menos	2,49
Dos números menos	3,15
Un número menos	3,97
Calibres menores	
Calibres del diagrama	
Un número más	6,30
Dos números más	7,95
Tres números más	10,02

cen a un grupo de longitudes de línea *versus* impedancia de línea, para frecuencias designadas como límite superior, en las que la transmisión origina 3 dB de pérdida con respecto a las frecuencias bajas. La longitud de la línea no debe exceder el valor correspondiente a la particular impedancia de la línea, para la seleccionada frecuencia límite superior, so pena de que la transmisión en alta frecuencia sea debilitada. El otro aspecto es que la inevitable pérdida de potencia en la línea quede reducida a un tope, que en la familia de curvas, dando la longitud de la línea frente a la impedancia de línea, para los tamaños corrientes de hilo, hemos limitado en un 5 %. En los ejemplos siguientes se verá, pues, que es posible con dicho diagrama tomar en cuenta la deformación o atenuación de las frecuencias altas y las pérdidas de energía.

Uso del diagrama

Línea más económica. Es la que requiere menos cobre y, por tanto, menor diámetro; por ejemplo, para una línea de 1500 pies con transmisión hasta 7500 c/s basta moverse horizontalmente sobre 1500 hasta encontrar la curva de 7500, y después, verticalmente hacia abajo, encontramos una impedancia *standard* más próxima de 250 Ω y un tamaño del n.° 16 (punto A).

Impedancia de línea fija (¹). Si en el ejemplo anterior la impedancia de salida del amplificador es 200 Ω, ¿cuál debe ser el efecto de la línea trabajando a 200 Ω? La intersección de 1500 pies y 200 Ω, cae en la curva de 10 000 c/s (punto B), de modo que la línea será más que adecuada para los 7500 c/s. El punto B indica, sin embargo, un tamaño n.° 15 entre el 14 y el 16, para el 5 % de pérdidas, que es más caro que el 16, necesario para la línea más económica (punto A 250 Ω). Si elegimos el 14, el coste será más caro, pero las pérdidas se reducirán al 3,97 %; pero con el n.° 16, más barato, las pérdidas se elevan al 6,3 %, que sólo serán tolerables si el amplificador tiene suficiente margen de potencia.

Máxima longitud de la línea. ¿Cuál es la máxima longitud de línea del n.° 18 compatible con los 10 000 c/s? Siguiendo la curva del número 18 hasta la de los 10 000 c/s, nos da punto C, 1050 pies a 270 Ω. Para 250 Ω punto D, la máxima longitud es 970 pies. Para cualquier otra impedancia, la máxima longitud con ese hilo está dada por la curva XCY, así,

para	100 Ω	390 pies
»	200 »	790 »
»	500 »	600 »

Evidentemente, se pueden emplear menores longitudes que esos valores.

Determinación de las pérdidas en la línea. Una línea de 200 Ω tiene una longitud de 1200 pies, ¿cuáles son sus pérdidas? Para una línea de igual impedancia y pérdidas del 5 %, su máxima longitud es de 790 pies, punto E. Para la línea de 1200 pies, las pérdidas serán proporcionalmente más grandes, es decir:

$$\frac{1200}{790} \times 5\ \% = 7{,}6\ \%$$

Determinación de la potencia de entrada en la línea. La potencia de entrada en la línea es igual a la potencia en la carga dividida por

(¹) Se suele designar así el valor de R_0, y no debe confundirse con el valor r resistencia de la línea.

la eficacia de la línea. En el ejemplo anterior, la eficacia de la línea es 1 — 0,076 = 0,924 (92,4 %). Si, por ejemplo, la potencia requerida en la carga total en el extremo de la línea es de 20 W, la potencia de entrada en la línea será 20/0,924 = 21,6 W.

Nota. La potencia total de la carga en el extremo de la línea incluye: *a*) la potencia total requerida por los altavoces más la potencia derdida en los transformadores de altavoces, y *b*), la potencia perdida en el transformador auxiliar si se emplea uno de éstos. En el cómputo preciso de potencia necesaria, estas pérdidas deben tomarse en cuenta. Análogamente, la cifra de 21,6 W anterior es menor que la actual necesaria, cuando se emplee un transformador auxiliar entre el amplificador y la entrada de línea.

Conductores. A continuación damos una tabla de los conductores y cables más corrientes empleados por ingleses (Standard Wire Gauge [S. W. G.]) y americanos (American Wire Gauge [A. W. G.] y Brown & Sharpe [B. & S.]), de los cuales, mediante la tabla de conversión de pulgadas en milímetros, dada en otro lugar de esta obra, y las indicaciones que siguen, es fácil encontrar los calibres equivalentes más próximos del actual mercado español ([1]). Para su uso conviene tener en cuenta las siguientes observaciones, dirigidas a aquellos que no tengan demasiada práctica en su manejo:

Los números que indican los calibres en A.W.G. y S.W.G. son sensiblemente los mismos, y en ambos casos el diámetro está expresado en milésimas de pulgada, es decir, fracciones decimales de 0,0254 mm, de modo que, por ejemplo, para el calibre A. W. G. n.° 3, cuyo diámetro en mils vale 229, su diámetro en milímetros vale 229 × 0,0254 = = 5,8 mm. Las secciones de hilos se suelen expresar en pulgadas cuadradas, una de las cuales representa el área de un cuadrado que tiene una pulgada de lado y que vale 645,16 mm² de superficie, o bien se expresa en *mils circulares*, siendo cada unidad de éstas el área de un círculo cuyo diámetro es una milésima de pulgada y que expresado en milímetros valdrá, por tanto, $\frac{\pi \times 0{,}025{,}4^2}{4} = 0{,}00051$ mm². Después de esta definición, conocido el diámetro del conductor en milésimas de pulgada (mils), su cuadrado expresa la sección en mils circulares, MC, y multiplicando este valor por 0,00051 se obtiene su sección en milímetros cuadrados.

Los calibres americanos son tales que los diámetros crecen en progresión geométrica de razón $q = 1{,}1229322$; por ello, para un diámetro doble de otro se obtiene aproximadamente un decremento de seis números en el calibre; para una resistencia doble de otra, un incre-

(¹) Para calibres métricos, véase normas DIN recientemente editadas en castellano por Iyorra, Bilbao.

mento de tres números de calibre, y para un peso doble de otro se obtiene un incremento de tres números en el calibre.

La corriente tolerable a 1000 MC por amperio es igual al área de la sección en mils circulares dividido por 1000.

Finalmente, los valores indicados en la forma, por ejemplo, 7/0,036, demuestran que se trata de un cable de 7 conductores, cada uno de los cuales tiene un diámetro de 0,036 pulgadas.

Tabla de calibres de conductores, sistemas inglés y americano

B & S o A.W.G.	Diámetro en mils	Área en mils circulares 0,00051 mm²	Ohmios por 1000 pies (305 m)	Corriente máxima a 1500 MC por amperio	Diámetro en mm	Calibre más aproximado S. W. G
1	289,3	82690	0,1264	55,7	7,348	1
2	257,6	66370	0,1543	44,1	6,544	3
3	229,4	52640	0,2009	35,0	5,827	4
4	204,3	41740	0,2533	27,7	5,189	5
5	181,9	33100	0,3195	22,0	4,621	7
6	162,0	26250	0,4028	17,5	4,115	8
7	144,3	20820	0,5080	13,8	3,665	9
8	128,5	16510	0,6405	11,0	3,264	10
9	114,4	13090	0,8077	8,7	2,906	11
10	101,9	10380	1,018	6,9	2,588	12
11	90,74	82340	1,284	5,5	2,305	13
12	80,81	6530	1,619	4,4	2,053	14
13	71,96	5178	2,042	3,5	1,828	15
14	64,08	4107	2,575	2,7	1,628	16
15	57,07	3257	3,247	2,2	1,450	17
16	50,82	2583	4,094	1,7	1,291	18
17	45,26	2048	5,163	1,3	1,150	18
18	40,30	1624	6,510	1,1	1,024	19
19	35,89	1288	8,210	0,86	0,9116	20
20	31,96	1022	10,35	0,68	0,8118	21
21	28,46	810,1	13,05	0,54	0,7230	22
22	25,35	642,4	16,46	0,43	0,6438	23
23	22,57	509,5	20,76	0,34	0,5733	24
24	20,10	404,0	26,17	0,27	0,5106	25

Tabla II. Cables en calibres ingleses

Calibre	Sección en pulgadas cuadradas	Corriente máxima Amp./pulgadas²	Ohmios por 1000 yardas (914 m)	Ohmios por circuito de 100 yardas
1/0,036	0,001	4,1	23,6	4,72
1/0,044	0,0015	6,1	15,8	3,16
3/0,029	0,002	7,8	12,36	2,472
3/0,036	0,003	12,0	8,02	1,604
1/0,064	0,003	12,9	7,46	1,492
7/0,029	0,0045	18,2	5,28	1,056
7/0,036	0,007	24,0	3,43	0,686
7/0,044	0,01	31,0	2,29	0,458
7/0,052	0,0145	37,0	1,64	0,328
Cable flexible standard				
14/0,0076	0,0006	1,8	39,7	7,94
23/0,0076	0,001	3,0	24,2	4,86
40/0,0076	0,0017	5,0	13,9	2,78
70/0,0076	0,003	8,5	7,94	1,588

Nota. La columna 5.ª de esta segunda tabla representa la resistencia de hilo de ida y vuelta de un circuito de 100 yardas (91,4 m) de longitud.

XVIII. Regulación de volumen en la etapa de salida (1)

En los equipos de reproducción sonora cinematográfica, así como en los de audiodistribución, que llevan varios altavoces con la misma impedancia de la bobina móvil, se presenta el caso de tener que acoplar a la salida del amplificador principal o de potencia varios de aquéllos con distinta potencia en cada uno, y entonces el procedimiento más sencillo y económico consiste en emplear un autotransformador con tomas convenientemente diseñadas de modo que pueda reducirse el volumen o potencia que se comunica a cada altavoz, en una medida conveniente.

FIG. 340

En la figura 340 se representa el caso; pero el problema radica en saber en qué tomas pueden intercalarse los precitados altavoces de modo que no haya un excesivo desequilibrio de impedancias, y, como consecuencia, una pérdida de volumen y una correlativa deformación.

El análisis que hemos hecho antes (Capítulo XIV, *Condición de máxima transferencia de energía del generador a la carga*, muestra que si la impedancia de carga es para una toma determinada, mucho menor que el valor para el que dicha toma ha sido diseñada, la respuesta en las altas frecuencias se reduce, mientras que aumenta ligeramente para las bajas frecuencias del espectro audible. Por el contrario, cuando la carga es mayor que la que corresponde al proyecto, la cresta para la cual el secundario entra en resonancia es muy aguda y puede originar una oscilación o, como suele decirse, el «canto» para esa frecuencia. Las pérdidas en los bajos, que son debidas al paso de la inductancia del primario, se hacen más acentuadas, y el sonido en su totalidad se hace más agudo o chillón. La potencia de salida también se reduce en alto grado, pues la corriente en el secundario queda

(1) Este capítulo es transcripción de nuestro trabajo publicado en la Revista de Telecomunicación, n.° 8, junio 1947.

limitada por la impedancia de carga, que en este caso es excesiva; en definitiva, *hay una pérdida de potencia y una deformación del sonido.*

El empleo de los *índices de impedancia* y su juiciosa elección permite, hasta donde es posible con el uso del autotransformador, reducir estos inconvenientes, de modo que el sonido tenga sensiblemente las mismas cualidades que si el sistema estuviese equilibrado. El objeto de este capítulo es, pues, mostrar cómo pueden determinarse las tomas en el autotransformador de modo que se logre una atenuación de n en n dB (en particular de dos en dos, lo que es más aconsejable para la respuesta del oído humano), a medida que se toman menos espiras en la parte activa del secundario para cada altavoz. La falta de información adecuada para el diseño de tales autotransformadores nos ha impulsado a ello.

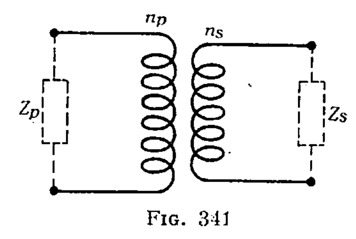


FIG. 341

Factor de impedancia del primario en función de la atenuación. Supongamos un transformador que acopla dos impedancias tal como el mostrado en la figura 341; según es sabido, la relación entre las tensiones, impedancias y números de espiras de primario y secundario viene dado por

$$\frac{E_p^2}{E_s^2} = \frac{Z_p}{Z_s} = \frac{n_p^2}{n_s^2}$$

y la energía recogida en el secundario por el altavoz allí conectado vendrá dada, salvo pérdidas en el transformador por mal rendimiento, por

$$W_0 = \frac{E_s^2}{Z_s}$$

que es la máxima, esto es, con cero pérdidas en decibelios.

Si se quisiera lograr una atenuación de 3 dB, se debería tener llamando W a la energía recogida por el altavoz:

$$10 \log \frac{W_1}{W_0} = -3 \text{ dB}$$

lo que exige que se tenga

$$\frac{W_1}{W_0} = \frac{1}{2};$$

pero para reducir la energía a su mitad debe verificarse:

$$\frac{W_1}{W_0} = \frac{E_1^2}{E_s^2} = \frac{1}{2}, \quad \text{o sea,} \quad E_1 = \frac{E_s}{\sqrt{2}}$$

y suponiendo igual impedancia.

Para conseguir esta reducción de tensión en el secundario, o, en general, que se tenga $E_j = \frac{E_s}{\sqrt{\eta}}$, se precisará reducir el número de espiras activas en el secundario, haciendo una toma en él, de modo que se tenga:

$$\frac{E_j}{E_s} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{n_j}{n_s}$$

$$\frac{E_j}{E_s} = \frac{1}{\sqrt{\eta}};$$

esto tiene como contrapartida un aumento automático en la impedancia del primario, ya que entonces, llamando Z^1_p la impedancia reflejada en el primario, se tendrá:

$$\frac{Z'_p}{Z_s} = \frac{n_p^2}{n_j^2} = \frac{n_p^2}{\frac{n_s^2}{\eta}} = \frac{\eta n_p^2}{n_s^2} = \frac{\eta Z_p}{Z_s}$$

de donde

$$\boxed{Z'_p = \eta Z_p};$$

este número η por el que hay que multiplicar la impedancia primaria del transformador con todas sus espiras activas, para obtener la que se obtiene cuando sólo se toman unas cuantas, es lo que se llama *factor de impedancia.*

Entonces las energías respectivas (supuesto el transformador sin pérdidas, esto es, con rendimiento del 100 por 100) valdrán:

$$W_0 = \frac{E_p^2}{Z_p} \quad ; \quad W_1 = \frac{E_p^2}{\eta Z_p}$$

y por tanto,

$$\frac{W_1}{W_0} = \frac{1}{\eta}$$

o sea, llamando N_{dB} a la atenuación en decibelios,

$$10 \log \frac{W_1}{W_0} = -N_{dB} = -10 \log \eta,$$

de donde

$$\boxed{\log \eta = \frac{1}{10} N_{dB}} \qquad [1]$$

Así, por ejemplo, en el cuadro siguiente se dan las atenuaciones correspondientes a otras tantas tomas en el secundario, en función del porcentaje del total de vueltas del secundario o de la tensión total en los extremos del secundario, y la impedancia primaria obtenida en porcentaje de la normal correspondiente a la totalidad de las espiras del secundario.

Atenuación	% del total de vueltas del voltaje total	Impedancia primaria (% de la normal)
0 dB	100 %	100 %
3 dB	70,7	200
6 dB	50,0 %	400 %
9 dB	35,3 %	800 %

Si, por ejemplo, la impedancia del primario, con el secundario entero, es 2000 ohmios, esta impedancia será aumentada a 3,2 veces 2000 ohmios, es decir, 6400 ohmios, si se reduce en el secundario el volumen en 5 dB por la toma corespondiente.

La última expresión obtenida [1] puede representarse gráficamente en papel semilogarítmico, y nos dará el factor de impedancia del primario η en función de la atenuación o pérdida en dB, y representa una recta que pasa por el origen de pendiente 1/10.

Evidentemente, la reducción de espiras del secundario será $\frac{1}{\sqrt{\eta}}$ del número total de espiras n_s de dicho devanado, o sea:

$$n'_s = \frac{n_s}{\sqrt{\eta}} \quad ; \quad \log n'_s = \log n_s - \frac{1}{2} \log \eta =$$

$$= \log n_s - \frac{1}{20} N_{dB}$$

es decir,

$$\log \frac{n'_s}{n_s} = - \frac{1}{20} N_{dB}$$

y llamando β al *factor de espiras* $\frac{n'_s}{n_s}$ se tendrá, puesto que $n'_s = \beta n_s$

$$\boxed{\log \beta = - \frac{1}{20} N_{dB}} \qquad [2]$$

De la comparación de [1] y [2] se deduce:

$$\log \beta = - \frac{1}{2} \log \eta \qquad [3]$$

para cada valor constante de N_{dB}. Esta fórmula [3] nos permitirá, sobre la misma gráfica y hacia abajo en el eje logarítmico, representar gráficamente el factor β de espiras, sin más que tomar en dicho sentido una recta que pase por el origen y que tenga una pendiente mitad de la anterior (fig. 342).

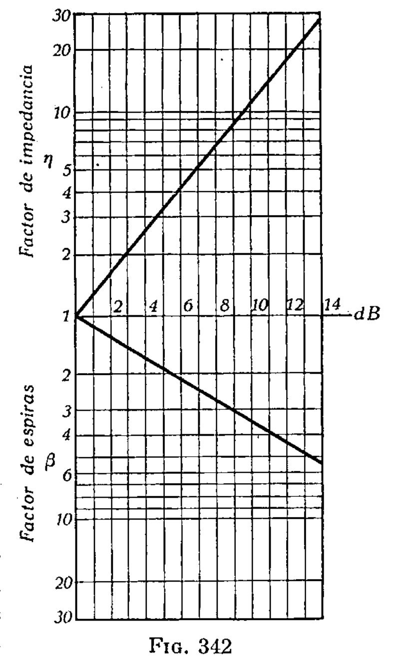


Fig. 342

Relación de impedancias e índice de impedancias del autotransformador. Si en lugar de un transformador utilizamos un autotransformador entre los impedancias Z_p y Z, debe verificarse la relación

$$\frac{E_p}{E} = \frac{n_p}{n} = \sqrt{\frac{Z_p}{Z}}$$

entre las tensiones primaria y en la toma que actúa como secundario, y entre las respectivas espiras del primario n_p y de dicha toma o derivación.

Supongamos que Z conectada a la salida es siempre constante e igual a la impedancia del altavoz o receptor, y que como secundario hacemos diversas tomas de n_1, n_2, ... n espiras; evidentemente, la mejor transferencia de energía en ellas se obtendría para impedancias virtuales de valor Z_1, Z_2, ... Z_j dadas por:

$$\frac{E_p}{E_1} = \frac{n_p}{n_1} = \sqrt{\frac{Z_p}{Z_1}} \quad ; \ldots \quad \frac{E_p}{E_j} = \frac{n_p}{n_j} = \sqrt{\frac{Z_p}{Z_j}}$$

con tensiones E_1, E_2, ... E_j entre las espiras activas que actúan como secundario.

La relación Z_p/Z se llama *relación de impedancias*, y no es otra cosa que la que tendría un transformador de espiras n_p y n_j en primario y secundario.

Supongamos que en una toma cualquiera j colocamos no la carga de equilibrio Z_j, sino la carga Z, siempre la misma del receptor; la energía recogida en esta carga será

$$W_j = \frac{E_j^{\,1}}{Z}$$

mientras que la que recogeríamos tomando la relación de impedancias

relativa a la carga Z sería

$$W_{\text{máx}} = \frac{E^2}{Z}$$

que es la máxima para tal carga.

Dividiendo ambas se tendrá:

$$\frac{W_j}{W_{\text{máx}}} = \frac{E_j^2}{\mathrm{E}^2} = \frac{Z_j}{Z} = \frac{Z_p/Z}{Z_p/Z_j} \qquad [4]$$

Al valor Z_j/Z lo llamaremos *índice de impedancias*, o, mejor, índice de la impedancia Z_j para la impedancia Z, y representa la fracción de la energía total que recogemos en la impedancia Z cuando se conecta en la toma j.

Si ahora colocamos en las tomas 1, 2, 3, ... j otros tantos receptores, todos iguales de impedancia Z, la suma de las energías recogidas valdrá

$$W_1 + W_2 + \dots + W_j =$$

$$= W_{\text{máx}} \left(\frac{Z_p/Z}{Z_p/Z_1} + \frac{Z_p/Z}{Z_p/Z_2} + \dots + \frac{Z_p/Z}{Z_p/Z_j} \right)$$

El término dentro del paréntesis representa la suma de los índices, y evidentemente nunca puede ser mayor que uno, y cuanto más próximo sea a la unidad, tanto mejor utilizaremos la energía total comunicada al autotransformador y menor será la deformación; luego las mejores condiciones se obtienen cuando *la suma de índices es menor que uno y lo más próximo posible a dicho valor.*

Interesa saber qué atenuación se obtiene para un receptor de impedancia Z colocado en un toma j determinada; esto es, dónde habremos de hacer las tomas 1, 2, ... j, para que el receptor colocado en una de dichas tomas experimente una reducción dada en decibelios de la eneraíg recibida con respecto a la máxima que podría recoger si estuviese bien acoplado. Supongamos, como es el caso corriente, que queramos que la atenuación de una toma a la siguiente represente una pérdida de 2 dB.

Expresando las energías en decibelios se tendrá, de la [4]:

$$10 \log W_j = 10 \log W_{\text{máx}} + 10 \log \frac{Z_p/Z}{Z_p/Z_j}$$

si, por ejemplo, $Z_p = 500$ ohmios y $Z = 16\ \Omega$, la relación inicial de impedancias vale

$$500/16 = 31{,}2,$$

y si queremos determinar la toma j que produce una atenuación de 20 dB, se debe tener:

$$10 \log \frac{31{,}2}{500/Z_j} = -20.$$

De esta relación podremos determinar $Z_j = 500/3120$ ohmios, y de aquí sacar el número de espiras correspondiente a la precitada toma mediante la relación

$$\frac{n_j}{n} = \sqrt{\frac{Z_j}{Z}} \quad n_j = n\sqrt{\frac{Z_j}{16}} = n\sqrt{\frac{500}{16 \times 3120}}$$

en la que todos los restantes términos son conocidos.

La tabla que damos a continuación supone una impedancia de salida del amplificador de 500 ó 250 ohmios, con receptores de impedancia $Z = 16$ ohmios, lo que representa valores corrientes en los equipos de reproducción cinematográfica, y la atenuación se hace de dos en dos dB para cada dos tomas sucesivas:

Relac. imped. Z_p/Z_j	Índice imped. para 500	Atenuación dB	Índice imped. para 250	Atenuación dB
31,2	1,00	0	0,50	— 3
50	0,63	— 2	0,32	— 5
79	0,40	— 4	0,20	— 7
125	0,25	— 6	0,13	— 9
200	0,16	— 8	0,08	— 11
312	0,10	— 10	0,05	— 13
500	0,06	— 12	0,03	— 15
790	0,04	— 14	0,02	— 17
1250	0,03	— 16	0,02	— 19
2000	0,02	— 18	0,01	— 21
3120	0,01	— 20	0,005	— 23

Los valores obtenidos para una salida de 250 ohmios se explican fácilmente teniendo en cuenta que si en la expresión

$$\frac{Z_p/Z}{Z_p/Z_j} \qquad [5]$$

mantenemos constante la relación de impedancia correspondiente a la toma j Z_p/Z_j y variamos la impedancia de salida del amplificador, reduciéndola al valor $Z_p/2$, lo que alteramos es el numerador de la expresión [5], que entonces toma el valor $Z_p/2\ Z$, con lo cual el índice de la toma j se convierte en $\frac{1}{2} \cdot \frac{Z_p/Z}{Z_p/Z_j}$, obteniéndose así los valores de las dos últimas columnas.

Se puede determinar ahora la relación de espiras entre dos tomas consecutivas del siguiente modo:

$$10\left(\log \frac{Z_p/Z}{Z_p/Z_j} - \log \frac{Z_p/Z}{Z_p/Z_{j+1}}\right) = 10 \log \frac{Z_j}{Z_{j+1}} =$$

$$= 2 \text{ dB} \quad ; \quad \log \frac{Z_j}{Z_{j+1}} = \frac{1}{5} = 0{,}20$$

$$2 \log \frac{n_j}{n_{j+1}} = 0{,}20 \quad ; \quad \log \frac{n_j}{n_{j+1}} = 0{,}1, \quad \frac{n_j}{n_{j+1}} = 1{,}25$$

luego

$$\boxed{n_j = 1{,}25\, n_{j+1}} \qquad [6]$$

Partiendo de la totalidad de espiras n necesarias para el acoplo entre Z_p y Z, esta expresión nos permitirá determinar dónde debemos hacer las tomas para reducir 2 dB de una toma a la siguiente.

Es evidente que la *impedancia total* reflejada en el primario se obtendrá dividiendo Z_p por la suma de índices, ya que se tiene:

$$Z = \frac{Z_p}{\dfrac{Z_1}{Z} + \dfrac{Z_2}{Z} + \ldots + \dfrac{Z_j}{Z}} = Z\left(\frac{Z_p}{Z_1} + \frac{Z_p}{Z_2} + \ldots + \frac{Z_p}{Z_j}\right) =$$

$$= Z\left[\left(\frac{n_p}{n_1}\right)^2 + \left(\frac{n_p}{n_2}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{n_p}{n_j}\right)^2\right] =$$

$$= Z\,(N_1^2 + N_2^2 + \ldots + N_j^2]$$

donde $N_j = n_p/n_j$ es la relación de espiras del primario, a las n_j espiras activas que actúan como secundario para la toma j.

Caso de colocar varios altavoces en la misma toma *(j)*. Hasta ahora hemos considerado el caso de colocar un solo altavoz en cada una de las tomas del autotransformador. Si se colocan dos receptores en la toma j, la impedancia colocada en dicha toma valdrá $Z/2$, y, por tanto el índice de impedancias para esta toma se convierte en $2Z_j/Z$, es decir, se hace doble y, por tanto, el índice se deduce del de un solo altavoz multiplicando por dos, y, en general, para n altavoces colocados en una misma toma j, la impedancia colocada será Z/n y el índice correspondiente será

$$\frac{Z_j}{Z/n} = n\,\frac{Z_j}{Z}$$

es decir, n veces de un solo altavoz; así se ha calculado la siguiente tabla hasta ocho altavoces para los mismos valores de $Z_p = 500\ \Omega$ y $Z = 16\ \Omega$.

La ventaja de estas tablas para tipos determinados de autotransformadores que hayan de trabajar con un mismo tipo de altavoz y con amplificadores de impedancia de salida fija estriba en que con ellas se puede determinar en qué posiciones de los plots correspondientes a las tomas que actúen como secundarias se deben intercalar los distintos altavoces a fin de obtener la máxima potencia y la mí-

Índices de impedancia. *Número de altavoces en cada toma.*

Toma	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00
2	0,63	1,26	1,89	2,52	3,16	3,79	4,42	5,05
4	0,40	0,80	1,20	1,59	2,00	2,39	2,79	3,18
6	0,25	0,50	0,75	1,00	1,26	1,51	1,76	2,01
8	0,16	0,32	0,48	0,64	0,80	0,95	1,11	1,27
10	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
12	0,06	0,13	0,19	0,25	0,32	0,38	0,44	0,51
14	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32
16	0,03	0,05	0,08	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20
18	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10	0,11	0,13
20	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08

nima deformación: basta hacer que la suma de los índices correspondientes a los distintos altavoces, en las posiciones en que se han conectado, no excedan de la unidad y que sean de la mayor suma posible dentro de esa limitación.

XIX. Sistemas de altavoces empleados en reproducción sonora

No tiene gran interés aquí describir al detalle los distintos tipos de altavoces empleados en los equipos de reproducción sonora, ya que son los corrientemente conocidos y que, como es sabido, se agrupan en dos tipos: de *cono* y de *diafragma*. En general, todos los en uso hasta hace poco y preferidos eran del tipo electrodinámico, fundados en la fuerza ejercida por un campo magnético (creado por una corriente circulando en una bobina) sobre un conductor que corte las líneas de fuerza de dicho campo, fuerza o acción que será proporcional a la intensidad del campo, a la longitud del conductor y a la intensidad de la corriente que circula por el mismo; todos los altavoces fundados en esta propiedad son también conocidos con el nombre de altavoces de *bobina móvil* porque, en efecto, donde se ejerce la acción del campo excitador es sobre una bobina unida al elemento vibrante.

El funcionamiento de cualquiera de los dos tipos es tan complejo que conviene, no obstante, dar unas ideas sobre el mismo a fin de percibir de una manera clara las causas de la adopción de uno de los dos tipos en cada ocasión que se presente, especialmente teniendo en cuenta la reproducción más conveniente de una gama determinada de frecuencias, y la necesidad en el caso de la cinematografía sonora de un recubrimiento, lo más uniforme posible, del área de asientos del local en que haya de funcionar el sistema de altavoces en cuestión.

Cualquiera de los dos tipos antes citados que consideremos está constituído por un sistema muy complejo formado por elementos eléctricos, mecánicos y acústicos, los cuales, al entrar en vibración por la acción de las corrientes variables que llegan al altavoz, procedentes de la salida del amplificador, modifican, según la frecuencia de dicha corriente, la impedancia eléctrica del circuito, de un lado, y, de otro, la velocidad de vibración mecánica de tal sistema, y las características del foco o manantial de ondas sonoras en que tal sistema se convierte, desarrollando un tren de ondas sonoras que se propagan en el medio y llegan hasta el oído del espectador; el resultado de tales modificaciones de características es que la carga o resistencia opuesta por el

aire en inmediato contacto con aquel sistema mecánico vibrante [1] varía también según la frecuencia de la corriente, y con ello, la energía emitida a distintas frecuencias en forma de ondas sonoras, y el ángulo de dispersión según el cual son radiadas tales ondas sonoras. Consecuencia de ello es la necesidad de utilizar un tipo de altavoces para cada una de las secciones en que se divide la gama total de frecuencias a reproducir, que se adapta especialmente a tal sección; habiéndose hecho hasta hace unos años tal fraccionamiento en tres gamas *(three-way)*, pero quedando casi exclusivamente reducido a dos en los actuales sistemas hoy en uso y extendiéndose tal proceso incluso a los aparatos de radiodifusión de alta calidad.

En términos generales, un altavoz es un traductor *(transducer)* electroacústico, diseñado para radiar energía acústica en una sala o en un ambiente abierto, es decir, prácticamente, ilimitado; en la actualidad, casi todos los tipos son de diafragma, y la característica que distingue unos de otros es el procedimiento de acoplamiento entre el medio en el que se radia el sonido y el método utilizado para mover el diafragma. En general, se presentan pérdidas entre el diafragma y el medio a las bajas frecuencias. Los sistemas en uso para atenuar esas pérdidas en baja frecuencia son: el empleo de grandes diafragmas, grupos de diafragmas y formas variadas de bocinas y *baffles*.

Altavoces de cono

Son actualmente empleados para la reproducción de las bajas y medias frecuencias *(Woofer)*, en combinación, ya sea con pantallas sonoras planas *(baffles)*, ya con bocinas exponenciales, rectas o replegadas, terminadas en su boca de salida en una pantalla plana, con la finalidad que indicaremos más adelante. Son también los utilizados corrientemente en receptores de radiodifusión, y modernamente, en los aparatos de cine, tienden a ser reemplazados por magnéticos (campo inductor creado por un poderoso imán, lo que se ha logrado modernamente mediante una modificación sencilla del sistema utilizado por Kapitzka) y diseñados especialmente para equipos reproductores Western y R. C. A.

Para comprender el comportamiento de este tipo de altavoces frente a las distintas frecuencias, vamos a tomar en cuenta la fuerza o acción electrodinámica del campo sobre la bobina; si llamamos B a la densidad de flujo uniforme, del campo magnético en el entrehierro expresada en gauss, l a la longitud del hilo o cinta que constituye la

[1] Para un estudio más completo de tales sistemas remitimos al lector a nuestro trabajo: GIL SANTIAGO, *Estudio de sistemas vibrantes en uno, dos, tres e infinitos grados de libertad*, publicado en «Metalurgia y Electricidad», núms. 37-39 y 41 de los años 1940-1941, así como a *Nociones de Mecánica cuántica*, publicadas por el autor en la misma revista en julio-agosto y noviembre de 1941. (Ciclo de conferencias del prof. Schrödinger en el Instituto Rockefeller).

bobina móvil, expresada en centímetros, e i al valor de la intensidad de la corriente que la recorre en amperios, esa fuerza f_m en dinas viene dada por

$$f_m = \frac{B \cdot l \cdot i}{10}$$

si $i = I \cos \omega t$, es decir, si se trata de una corriente sinusoidal [1], la fuerza también lo será, y el sistema móvil entrará en vibración con una velocidad, que por tratarse de un sistema mecánico se obtendrá escribiendo que tal fuerza tiene que equilibrar a:

a) Las fuerzas de inercia que, como es sabido, se obtienen multiplicando la aceleración por la masa efectiva m, la cual se compone de las sumas de las masas del cono, bobina móvil y masa efectiva de la carga de aire asociada al cono, como más importantes.

b) La carga resistiva mecánica debida a la masa de aire que debe mover el cono, y que será donde se propague el sonido; esta fuerza resistente es, en principio, y para las velocidades moderadas, del espectro de audiofrecuencias proporcional a la velocidad, de modo que llamando R_r al factor de proporcionalidad, la fuerza resistiva originada por esta causa será $R_r \cdot v$, siendo v dicha velocidad del sistema vibrante.

c) Finalmente, existe un tercer término, que tiene su origen en las relaciones elásticas que se oponen al movimiento, las cuales se desarrollan en los elementos elásticos de suspensión del cono, en la araña *(spider)* de centraje de la bobina, y en las cavidades de aire que se encuentran en el entorno del sistema vibrante y que no teniendo una comunicación libre y abierta con la masa total del aire, actúan como muelles elásticos; todos estos términos dan lugar a una fuerza llamada de capacitancia *(compliance)*, porque, efectivamente, puede asimilarse cuando se refiere a la velocidad v, al efecto que produce una capacidad con respecto a una corriente eléctrica; llamaremos C a la inversa de ese coeficiente de elasticidad.

Entonces, mediante la igualación de tales fuerzas, se puede escribir:

$$v = \frac{B \cdot l \cdot i}{R_r + j\left(m\omega - \dfrac{1}{c\,\omega}\right)} \quad \text{(con } j = \sqrt{-1} \text{ como siempre)}$$

y se ve que el término $Z = R_r + j\left(m\,\omega - \dfrac{1}{c\omega}\right)$ equivale a una verdadera impedancia con respecto a la velocidad, y de aquí la denominación de *impedancia mecánica* con que suele designarse, existiendo también una frecuencia de resonancia mecánica f_r para la que la ve-

---

[1] Para el caso de una corriente más compleja, véase lo dicho en la nota al pie del Capítulo X, Acústica, relativo a la descomposición de Fourier.

locidad toma el máximo valor y la impedancia mecánica el mínimo, dada por

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{mC}}$$

así, para un altavoz de 8″, estos términos toman los valores:

$m = 12$ gr, $B = 8000$ gauss, $l = 1180$ cm y $C = 4{,}3 \times 10^{-7}$ cm/dina.

Además de esta impedancia mecánica, existe otra *impedancia de movimiento* (motional) que tiene su origen en la fuerza contraelectromotriz desarrollada en la bobina móvil al moverse y cortar las líneas de fuerza del campo magnético; llamaremos, pues, impedancia de movimiento a la diferencia entre la impedancia eléctrica normal (la medida en las bornas de la bobina móvil, cuando ésta está en movimiento) y la impedancia medida en las mismas bornas cuando dicha bobina está bloqueada (para lo cual impedimos su movimiento, por algún medio), a las acciones o fuerzas electrodinámicas que ejerce el campo cuando por ella circula la corriente; esta impedancia de movimiento alcanza su valor máximo, como vamos a ver, cuando la impedancia mecánica toma su valor mínimo, o sea, a la frecuencia de resonancia mecánica.

Para calcularla, observemos que si es e esa fuerza contraelectromotriz, su expresión, según la ley de Lenz, será

$$e = B \cdot l \cdot v$$

como la intensidad de la corriente la podremos determinar, la expresión de esa impedancia de movimiento Z_m tendrá por valor:

$$Z_m = \frac{e}{i} = \frac{B \cdot l \cdot v}{f_m/B \cdot l} = B^2 \cdot l^2 \frac{v}{f_m} = \frac{B^2 \cdot l^2}{Z} \qquad Z_m\, Z = B^2\, l^2$$

y puede asimilarse a una impedancia eléctrica en serie con la de la bobina móvil o impedancia eléctrica de la misma (1).

Resistencia de radiación. De los tres términos que intervienen en la expresión de la impedancia mecánica, nos falta computar el primero R_r que tiene carácter disipativo y es el más importante, porque de él depende la eficiencia del altavoz, es decir, la energía transformada en sonido para una energía eléctrica de entrada en el mismo, y cuyo valor se obtendrá, de un modo semejante a la energía disipada en una resistencia, multiplicando el valor de R_r por el cuadrado de la velocidad del sistema en movimiento.

(1) Conviene indicar aquí que Z se expresa en ohmios mecánicos o dina esgundos/cm y que Z_m en ohmios vale $Z_m = B^2l^2/Z \cdot 10^9$.

La evaluación del término R_r sólo se ha podido hacer de un modo aproximado, a partir de los trabajos de Rayleigh, en el estudio de la carga desarrollada por el aire sobre un pistón vibrando en un orificio practicado en una pared indefinida plana, con el auxilio de las funciones de Bessel; el resultado de tal estudio es que la carga del aire originada sobre el pistón por unidad de área equivale a una impedancia; es decir, tiene un término en fase con la velocidad del pistón, que es el disipativo y otro en cuadratura con dicha velocidad; la figura 343 muestra cómo varían ambos términos frente al factor kR, en el que $k = 2\pi/\lambda$, λ = longitud de onda del sonido y R es el radio del pistón; aquélla no es otra cosa que la representación gráfica de la expresión de dicha impedancia por centímetro cuadrado de pistón:

$$Z_1 = \varrho c \left(1 - \frac{J_1(2kR)}{kR}\right) + j\frac{\omega\varrho}{2R^2k^3} K_1(2kR),$$

la que para valores de $kR \ll 1$, o sea $2R \ll \frac{\lambda}{\pi} < \frac{\lambda}{2}$, se convierte en ([1]):

$$Z_1 = \frac{\varrho c\, k^2 R^2}{2} + j\frac{8R\omega\varrho}{3\pi} \qquad (a)$$

De las dos componentes de esta impedancia, solamente el término en fase con la velocidad tiene interés en el cálculo de la energía disipada, y cuando se trata de calcular las impedancias del altavoz, el término R_r que antes hemos encontrado se calcula a partir del término resistivo de esta impedancia del pistón mediante ciertas hipótesis, como vamos a ver a continuación.

Circuito equivalente a un altavoz. El examen de las ecuaciones dadas anteriormente para el altavoz permite mostrar que, en lo que se refiere a los circuitos eléctricos, el sistema mecánico vibrante es equivalente a un secundario de un transformador sintonizado; ello conduce a un circuito eléctrico equivalente tal como el representado en la figura 344, en el que la fuerza mecánica f_m que actúa sobre la bobina móvil es equivalente a la tensión inducida en el secundario mediante una impedancia de acoplamiento igual a la impedancia de movimiento. Así se observa que la impedancia mecánica del secundario es de la misma forma que la de un circuito sintonizado y que la velocidad de vibración es la análoga a la corriente eléctrica del circuito equivalente.

La energía disipada en la resistencia del secundario, de ese circuito eléctrico, será la precisa para mantener las vibraciones del cono

---

([1]) Aquí ϱ es la densidad del aire, $c = 340$ m/seg la velocidad del sonido, y $J(3kR)$ es una función de Bessel.

y la parte de esa energía disipada en la resistencia de radiación representa la cantidad de energía convertida en radiación en forma de sonido. Para más facilidad, vamos, como siempre, a considerar fraccionada la gama total de frecuencias así:

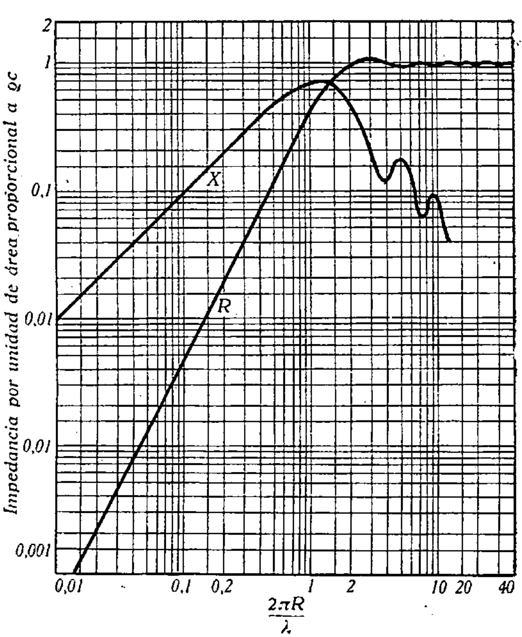


Fig. 343. Carga resistiva R y reactiva X por unidad de área, a un lado de un pistón vibrante de R cm de radio en un baffle infinito

a) Bajas frecuencias hasta 500 ó 1000 c/s. El comportamiento del cono a muy bajas frecuencias puede asimilarse al de un pistón cuyo diámetro sea igual al del cono; esto es cierto de un modo aproximado para algunos cientos de ciclos por segundo hasta las proximidades de los 1000 c/s en que se va reduciendo el diámetro del pistón equivalente, de tal modo que a los 1000 c/s aproximadamente las ondas radiadas sólo salen del vértice del cono, pero en primera aproximación, vamos a admitir que el pistón equivalente tiene el mismo diámetro del cono hasta los 1000 c/s; en tal caso, la resistencia de radiación R_r viene dada por la parte real de la carga de aire sobre el pistón, que, como vemos fácilmente de la expresión (α) y de la figura 343, supone un diámetro del cono menor que media longitud de onda del sonido radiado, y entonces tal resistencia de radiación, sin más

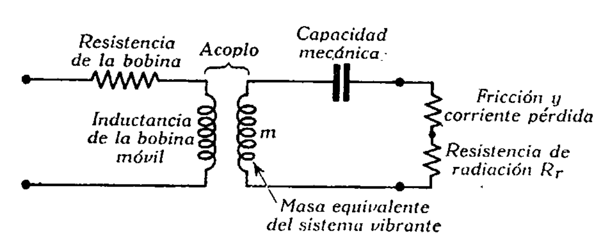


Fig. 344. Circuito equivalente de un altavoz de cono o diafragma

que poner $k = \dfrac{\omega}{c}$, es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Como la potencia radiada se obtiene multiplicando esta R_r por el cuadrado de la velocidad v, se podrá lograr que esa energía sea independiente de la frecuencia, con tal de que la velocidad

v sea inversamente proporcional a la frecuencia. Esto se logra fácilmente haciendo que la frecuencia de resonancia mecánica del sistema vibrante esté muy por debajo de la frecuencia más baja que se trata de reproducir, porque de este modo el término predominante en la expresión de la impedancia mecánica Z, es precisamente el término de inercia debido a la masa m, que, como se ve, cumple aquella condición.

b) Frecuencia de resonancia mecánica del sistema vibrante. A esta frecuencia, la impedancia mecánica Z queda reducida a la resistencia de radiación R_r, y, por consiguiente, la velocidad v tiende a adquirir una amplitud de valor extraordinariamente grande, al menos a primera vista; sin embargo, la potencia radiada en forma de sonido no crece *siempre*, como podría creerse, ya que hay que tener en cuenta el valor, también mayor, que por tal decrecimiento de Z toma la impedancia de movimiento Z_m, lo que en determinados casos (cuando la resistencia interior R_i de las válvulas de salida del amplificador de potencia es pequeña, frente a la carga del tubo, caso de tríodos), puede producir una atenuación de la potencia disipada en el altavoz y, por consiguiente, compensar esa tendencia a una cresta de la energía radiada, para tal frecuencia de resonancia. Como, por otra parte, la impedancia de movimiento es directamente proporcional al cuadrado del campo inductor, se comprende que, dando a éste valores convenientes, se pueda llegar a obtener, para esta frecuencia de resonancia mecánica f_r, una respuesta del sistema amplificador-altavoz, igual a la respuesta a las altas frecuencias, o una cresta, o un valle; es decir, la respuesta elegida en esa frecuencia es un compromiso entre el valor del campo inductor del altavoz y la resistencia interior de la válvula de salida, y la impedancia de movimiento con tríodos viene a compensar en cierto modo, con su crecimiento, la tendencia excesiva a una gran amplitud de vibración para la frecuencia de resonancia, en la misma medida que, como es bien conocido, queda detenida la oscilación de un galvanómetro de cuadro móvil, cuando se cortocircuita su devanado a través de una resistencia mucho menor que la de su bobina.

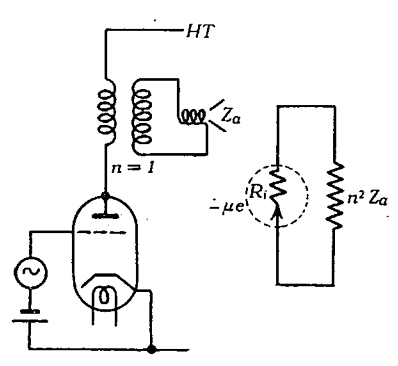


FIG. 345. Tríodo de salida con carga y circuito equivalente

Las cosas son muy diferentes cuando el tubo de salida es, por ejemplo, un pentodo de gran resistencia interior, frente a la carga efectiva que para tales casos presenta el altavoz a la frecuencia f_r; entonces sucede lo contrario, ya que la mayor parte de la energía del amplificador se disipa en su carga efectiva y al crecimiento de la amplitud de la velocidad se viene a sumar un crecimiento de energía transferida

al altavoz, originando una cresta todavía más aguda; no obstante, el recurso de la realimentación negativa, de que hablaremos más adelante (Capítulo XX), ha permitido modernamente reducir la resistencia aparente interior de un pentodo a los valores normales que toma en un tríodo y, con ello, eliminar el principal inconveniente que el uso de pentodos en audiofrecuencia presentaba por esta causa.

Unas consideraciones elementales tomadas de un trabajo de J. T. Terry, nos harán ver en forma muy precisa las ideas anteriormente expuestas; en la figura 345 se ve un tríodo en clase A acoplado con transformador de relación $n = n_1/n_2$, a un altavoz de bobina móvil, cuya impedancia efectiva vamos a llamar Z_a. La potencia disipada en el altavoz con las notaciones usuales vale

$$W = \left(\frac{\mu e}{R_i + n^2 Z_a}\right)^2 \cdot n^2 \cdot Z_a = \frac{\mu^2 e^2}{n^2 Z_a} \frac{1}{(1 + R_i/n^2 Z_a)^2} \qquad (\beta)$$

y si, como es el caso, la resistencia interior R_i es pequeña frente a $n^2 \cdot Z_a$, esa potencia es sensiblemente

$$W \to \frac{\mu^2 e^2}{n^2 Z_a} \quad \text{para} \quad R_i \to o.$$

Supongamos que a la frecuencia f_r de resonancia acústica, esa impedancia efectiva Z_a se hace diez veces mayor, por efecto del crecimiento de la impedancia de movimiento Z_m, entonces la potencia cedida al altavoz para esa frecuencia de resonancia valdrá

$$W_{(fr)} = \frac{\mu^2 e^2}{10\, n^2 Z_a} \times \frac{1}{(1 + R_i/10\, n^2 Z_a)^2}.$$

y por igual razón que antes, prescindiendo de R_i frente a la carga, la potencia que recibe el altavoz será con gran aproximación:

$$\underset{f \to f_r}{W_{(fr)}} = \frac{\mu^2 e^2}{10\, n^2 Z_a} = \frac{W}{10}$$

es decir, con un tríodo, esa *potencia varía, a la resonancia, muy aproximadamente, en razón inversa del aumento de impedancia efectiva del altavoz,* quedando de ese modo compensada la resonancia mecánica.

Supongamos, por el contrario, como es el caso de los pentodos, que R_i sea ahora muy grande frente a $n^2 Z_a$, para poder prescindir de este último término; entonces, la primera expresión antes obtenida (β) se convierte en:

$$\underset{n^2 Z_a \to o}{W} \to \frac{\mu^2 e^2}{R_i^2} n^2 Z_a$$

y si, como antes, para la frecuencia de resonancia, Z_a se hace diez veces mayor, pero no lo suficientemente grande para poder tomar en cuenta aquel término frente a R_i, la energía transferida al altavoz a la resonancia valdrá:

$$W_{(fr)} \underset{f \to f_r}{\rightarrow} \frac{\mu^2 e^2}{R_i^2} \cdot 10\, n^2 Z_a = 10 \cdot W$$

es decir, *la potencia crece ahora proporcionalmente a la impedancia efectiva* para tal resonancia, y, por tanto, todavía se acentúa más el efecto de resonancia mecánica, produciéndose así una verdadera discriminación de la misma.

Eligiendo, pues, adecuadamente el valor de B o, lo que es igual, tomando un campo inductor suficientemente intenso, se puede crear —y ello se hace muchas veces deliberadamente— una cresta aguda de resonancia en las bajas frecuencias, con el fin de aumentar la potencia radiada en las bajas frecuencias, compensando de este modo la respuesta del oído; pero, en realidad, esta práctica no es muy deseable, ya que, como hemos dicho al hablar de las redes divisoras, ello lleva consigo una oscilación transitoria muy pronunciada a la frecuencia de resonancia, cuando se produce cualquier excitación por choque o brusca del altavoz. Digamos, finalmente, que por debajo de la frecuencia de resonancia, la respuesta cae rápidamente, como consecuencia del incremento de la impedancia de los términos de elasticidad que se opone a la fuerza f_m.

c) Altas frecuencias. Entendemos por tales aquellas para las que el diámetro del cono excede a media longitud de onda del sonido emitido. En este caso, y según se deduce fácilmente de la figura 343, la resistencia de radiación R_r es muy aproximadamente independiente de la frecuencia, y, por consiguiente, la potencia radiada varía sensiblemente en razón inversa del cuadrado de la frecuencia si, como en el caso anterior, se admite una asimilación del cono a un pistón vibrando en una pantalla infinita y con velocidad inversamente proporcional a la frecuencia. Para compensar en parte esta tendencia de la respuesta a descender en las altas frecuencias rápidamente, se utiliza el recurso de diseñar el cono de modo que se desvíe, en cuanto a su vibración, de la del correspondiente pistón, descomponiéndole, por ejemplo, en anillos separados entre sí por elementos muy elásticos y sin apenas masa mecánica; el modo de vibración depende entonces de la configuración de tales anillos y de las relaciones de fase entre los mismos, y las vibraciones del cono toman la apariencia de ondas que se propagan desde el vértice, con el resultado de que dicho vértice o parte central del mismo lo hace más intensamente que los bordes o periferia, y reduciéndose el diámetro efectivo del cono a medida que aumenta la frecuencia. Con ello se reduce la masa efectiva del cono, aumentando su velocidad por encima de la que podría esperarse de la acción

del pistón equivalente, y con ello la potencia radiada en forma de sonido.

Finalmente, si todavía aumentamos más la frecuencia, la potencia radiada tiene una tendencia a caer para muy altas frecuencias, lo cual queda compensado, como vamos a ver, por la concentración de la energía radiada en un ángulo cada vez más pequeño, con eje en el del cono, a medida que aumenta la frecuencia; en última instancia, la respuesta en altas frecuencias está determinada por la masa de la bobina móvil.

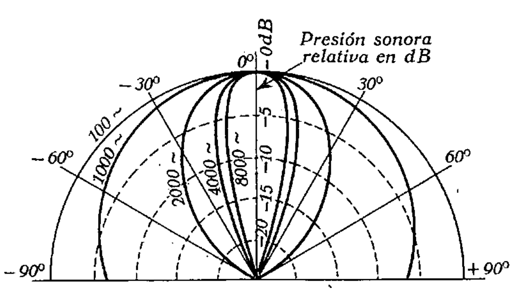


Fig. 346. Característica polar de un altavoz de 12″ con espacio libre a distancia infinita y con los lóbulos mayores solamente

Característica directiva del altavoz de cono. A las frecuencias para las cuales todas las partes del cono se mueven en fase, puede hacerse, como siempre, un cálculo de las características de directividad delaltavoz a partir del pistón equivalente; este método, que ha sido desarrollado por Stenzel y otros investigadores, ha conducido a la expresión

$$Q = \frac{2\, J_1 \left(\dfrac{kd}{2} \operatorname{sen} \alpha\right)}{\dfrac{kd}{2} \operatorname{sen} \alpha}$$

en la que Q es la relación entre la presión sonora en la dirección α y la correspondiente en el eje, d es el diámetro del pistón equivalente, $J_1 \left(\frac{kd}{2} \operatorname{sen} \alpha\right)$ representa una función de Bessel, y las demás letras tienen el significado atribuído anteriormente. La figura 346 muestra la característica teórica obtenida a partir de esa expresión para un altavoz de 12″, y la experiencia confirma estos resultados. Se ve, pues, que a medida que aumenta la frecuencia, la potencia radiada se concentra en un ángulo cada vez más pequeño sobre el eje del cono, lo que tiene especialmente mucho interés por los efectos perjudiciales que produce, en el recubrimiento del área de audición de un local, pues los espectadores desviados del eje del cono perciben una reproducción de sonido rica en bajas frecuencias, mientras que los situados en el eje perciben el efecto contrario. Se comprende, pues, que en virtud de esa concentración sea relativamente fácil obtener una respuesta plana o uniforme para todas las frecuencias sobre todos los puntos que se encuentren aproximadamente en el eje del cono, esto es, una presión constante para todas las frecuencias a reproducir, y

que una respuesta de presión sobre el eje, plana para las distintas frecuencias, lleva consigo una caída de la radiación total, es decir, de la radiación en puntos alejados o separados del eje, a medida que aumenta la frecuencia. Así, por ejemplo, en la figura 347, para un altavoz de 12″, se ve que para 5000 c/s y una presión axil constante sobre el eje, la radiación total cae a esa frecuencia 18 dB por debajo de la de las bajas frecuencias. La misma figura nos muestra también que si deseamos mantener constante la radiación total a esos 5000 c/s respecto a los bajos, es decir, una respuesta de radiación total plana, la respuesta de presión axil debe aumentar a 5000 c/s en 18 dB sobre el valor que toma para las otras frecuencias bajas. Con altavoces de pequeño diámetro, el efecto decrece, no siendo apenas direccionales; pero este efecto es todavía notable para los de 5″. Sin embargo, el principio de elevar la respuesta en altas frecuencias del amplificador para elevar la axil del cono y mantener de ese modo la radiación en las altas frecuencias, no es apenas empleado en cine sonoro, como veremos después, pero es útil para mejorar las condiciones de radiación de los altavoces directos simples. Otro sistema también utilizado consiste en diseñar altavoces especialmente para radiar las altas frecuencias, los cuales son de pequeño diámetro *(tweeters)*, y otros de gran diámetro, para las bajas *(woofers)*, intercalando redes divisoras de frecuencias, y éste es el más moderno utilizado, pero convenientemente mejorado, como luego veremos. Digamos de paso que el rendimiento práctico de un altavoz de cono en condiciones normales no excede de un 5%.

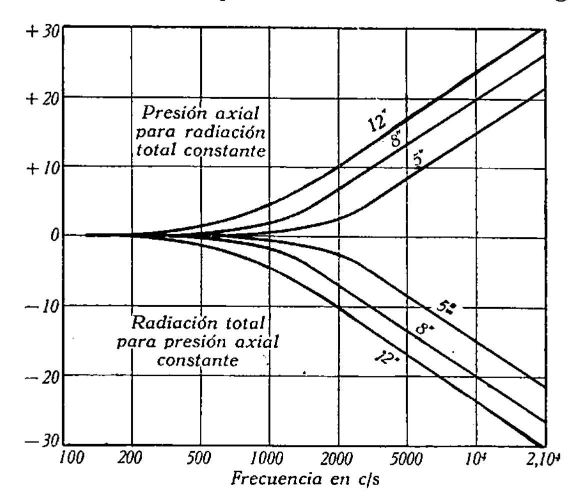


Fig. 347. Se supone reemplazado el altavoz por un pistón equivalente vibrando en *baffle* infinito en espacio libre

Pantallas planas o «baffles». El rendimiento electroacústico de los altavoces, esto es, la energía acústica que se obtiene a partir de una energía eléctrica dada, es muy pequeño debido principalmente al mal acoplamiento existente entre el cono y el aire que debe ser movido por aquél; con el fin de aumentar este rendimiento se emplean *transformadores acústicos* virtuales, que permiten equilibrar la impedancia mecánica de la parte móvil del altavoz con la impedancia acústica

opuesta por la carga de aire sobre el cono o diafragma según los casos; tales transformadores son los *baffles* y las bocinas.

Un *baffle* no es más que una pantalla plana colocada en la base del cono, y su finalidad es aumentar el recorrido del aire desde la parte anterior de la boca del cono a la parte posterior del mismo.

Cuando un cono vibra, las ondas enviadas hacia delante y hacia atrás del mismo están en oposición de fase, y hay una tendencia de la sobrepresión desarrollada delante del cono a atenuarse o reducirse, mediante un flujo de aire hacia la región posterior del cono a través de su periferia, en lugar de propagarse esta sobrepresión hacia delante; este efecto es tanto más marcado cuanto menor es la frecuencia, porque entonces, siendo relativamente lenta la velocidad del cono, antes de que éste haya vuelto hacia atrás, después de haber originado una compresión en el sentido de su radiación, el aire ha fluído por su contorno hacia atrás, compensando la depresión que se originó detrás del cono, y reduciendo, por consiguiente, la energía de compresión al mismo tiempo que ésta, delante del altavoz. Si el aire en los bordes del cono, por el efecto de la intercalación de una pantalla, tiene que recorrer un camino suficientemente largo para que el tiempo que tarde en llegar a la parte posterior del cono sea mayor que el empleado por el cono en su retroceso, no habrá, cuando llegue allí, depresión de aire, ni, por consiguiente, aquella pérdida de energía sonora, para lo que en primera aproximación basta que el diámetro del *baffle* sea ligeramente superior a un cuarto de la longitud de onda correspondiente a la frecuencia más baja. En la figura 348 se ven las respuestas de un cono de 8″ con *baffles* de distintas dimensiones; todas ellas son semejantes, salvo que se han desplazado hacia las bajas frecuencias a medida que crece el tamaño de la pantalla, supuesta cuadrada. Observando atentamente la figura, se observa un valle que corresponde a distinta frecuencia para cada tamaño, y el cual tiene su origen en que, habiendo hecho el *baffle* de forma regular, todos los caminos acústicos posibles alrededor de la pantalla son iguales, y, por tanto, para aquella frecuencia para la que la diferencia de caminos acústicos sea precisamente igual a una longitud de onda, hay una interferencia con un mínimo.

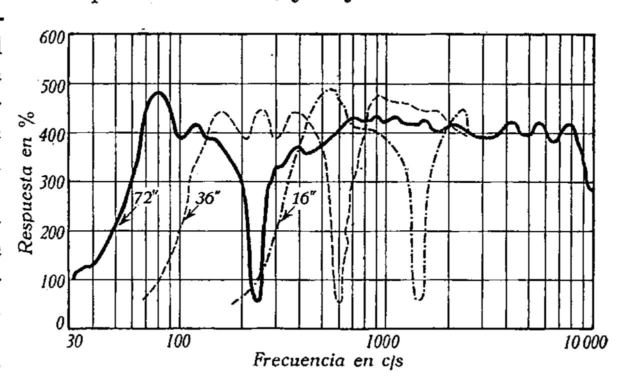


FIG. 348. Característica en % de un cono de 8″ montado en *baffles* cuadrados de distintos tamaños, en espacio libre y con micro a 10 pies de distancia

Esto aconseja hacer los *baffles* de forma irregular y no circulares o cuadrados, con lo que desaparece tal mínimo o valle.

Altavoces de diafragma. El mayor inconveniente que presenta el altavoz de cono es, como hemos dicho, su mal rendimiento, motivado por un acoplamiento defectuoso entre el cono, que es relativamente pesado, y el aire; cuando se trata de manejar grandes potencias y mejorar ese rendimiento se utiliza el altavoz de diafragma, que está constituído (fig. 349) por un diafragma de duraluminio, de forma esférica, para aumentar su rigidez, y cuya bobina móvil se construye con cinta del mismo material, devanada de perfil, lo que contribuye a reducir su capacidad distribuída y, por tanto, la impedancia eléctrica de la bobina, favoreciendo la obtención de una respuesta casi plana y una resistencia sensiblemente uniforme dentro de la gama a reproducir. A fin de reducir la resonancia del diafragrama, éste lleva una serie de arrugas radiales ligeramente oblicuas entre la bobina y el anillo exterior sobre que va sujeto, lo que permite, además, que vibre muy aproximadamente como un pistón. Delante del diafragma hay una *cámara de aire*, terminada en una estrangulación o garganta y a la cual se acopla la base menor de una bocina de sección creciente al alejarse de esa garganta. Dicha cámara de aire tiene por finalidad aumentar la carga de aire sobre el pistón, ya que éste, cuando es comprimido por el diafragma, encuentra dificultad para salir por la garganta, y al mismo tiempo sirve de amortiguador de la resonancia del diafragma.

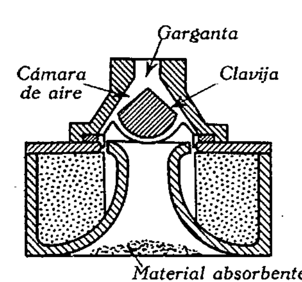


FIG. 349. Sección de un receptor de diafragma

El área de la garganta determina la carga que la bocina produce sobre el diafragma; cuando éste tiene igual superficie activa que aquella garganta, se demuestra que la impedancia mecánica que se opone al movimiento del diafragma vale 42 Ω mecánicos por centímetro cuadrado; pero si para mejorar el rendimiento hacemos la sección de la garganta de una superficie S_g y la del diafragma es S_d, la nueva carga por centímetro cuadrado sobre el diafragma valdrá ahora $42 \cdot S_d/S_g$. No se debe exagerar esa estrangulación, porque ello exigiría una bocina más larga a fin de reducir la presión en la boca de salida de la bocina, ya que de otro modo se producirían reflexiones perjudiciales; por otra parte, se aumentarían las pérdidas por frotamiento y se produciría una deformación por exceso de presión; la determinación del área de la garganta es, pues, resultado de un compromiso entre todos estos factores.

Como vimos al tratar del cono, el último límite de reproducción en alta frecuencia viene determinado por la masa de la bobina móvil y diafragma, lo cual supone como indispensable que la distancia

de la garganta a los distintos puntos del diafragma varíe en menos de media longitud de onda del sonido a transmitir, puesto que de otra manera las ondas sonoras producidas en esos puntos, al sumarse, no se encontrarán en fase, y por tanto, habría una caída en la respuesta en esas frecuencias altas. Para reducir en lo posible estas dificultades, entre el diafragma y la garganta se interpone una clavija u obstáculo anular que permite igualar la distancia entre la garganta y los distintos puntos del diafragma.

Finalmente, en la parte posterior del diafragma lleva un material absorbente, una bola de algodón, etc., que tiene por finalidad recoger la energía sonora que el diafragma envía hacia atrás, evitando la producción de ondas estacionarias detrás del mismo, las cuales podrían originar cambios bruscos de impedancia acústica con la frecuencia, detrás del diafragma, perturbando su funcionamiento.

La potencia radiada por un altavoz de este tipo es proporcional al cuadrado de la velocidad del diafragma, y, por consiguiente, para obtener una respuesta que sea muy sensiblemente independiente de la frecuencia, es necesario que la impedancia que ofrece el sistema vibrante a la fuerza exterior f_m sea esencialmente resistiva, y esta condición se logra haciendo la carga acústica en el diafragma lo más grande posible, y diseñando el sistema vibrante de modo que su frecuencia de resonancia caiga en el centro de la gama de frecuencias a reproducir. En tales condiciones, la impedancia es predominantemente resistiva y la velocidad relativamente independiente de la frecuencia.

El rendimiento electroacústico depende de la relación de las pérdidas en el cobre a la resistencia de radiación, y es tanto mayor cuanto más alta sea la carga del diafragma; esto nos indica, como hemos insinuado antes, la conveniencia de una garganta pequeña, pero con los compromisos citados; en tales condiciones, este rendimiento alcanza valores entre un 25 a un 50 %, habiendo llegado Western con los altavoces magnéticos Altec-Lansing, a alcanzar últimamente el 60 %.

Bocinas. Con los receptores de diafragma es más conveniente emplear como transformador acústico bocinas que *baffles;* una bocina no es más que un tubo de sección creciente a medida que nos alejamos de su garganta o sección de área mínima, por la que se une a la cámara de aire, y constituye un verdadero transformador que recoge en su garganta la energía sonora a gran presión y débil velocidad, para entregarla, en su boca o sección máxima, al medio de propagación, interpuesto entre ella y el oído del espectador, a débil presión y gran velocidad, y de tal modo que se transfiera a este medio sin apenas reflexión perjudicial. Al mismo tiempo, y por ser de sección creciente, se reducen las pérdidas por frotamiento a medida que progresa la onda, evitando la deformación del frente de onda, y se logra aumentar grandemente la impedancia acústica que origina la columna de aire.

Prácticamente existen tres tipos de bocinas: la *parabólica*, en la que la sección S a la distancia x de su garganta viene dada por $S = S_o \cdot x$, es decir, la sección es proporcional a la distancia; la *cónica*, en que tal sección es proporcional al cuadrado de la distancia, esto es, $S = S_o \cdot x^2$, y, finalmente, la *exponencial*, en la que el crecimiento de la sección con la distancia es logarítmica y cuya sección a la distancia x puede escribirse en la forma $S = S_o\, e^{mx}$, siendo $e = 2{,}7182...$ la base de los log neperianos (¹). En la figura 349 bis se muestra para estos tres tipos

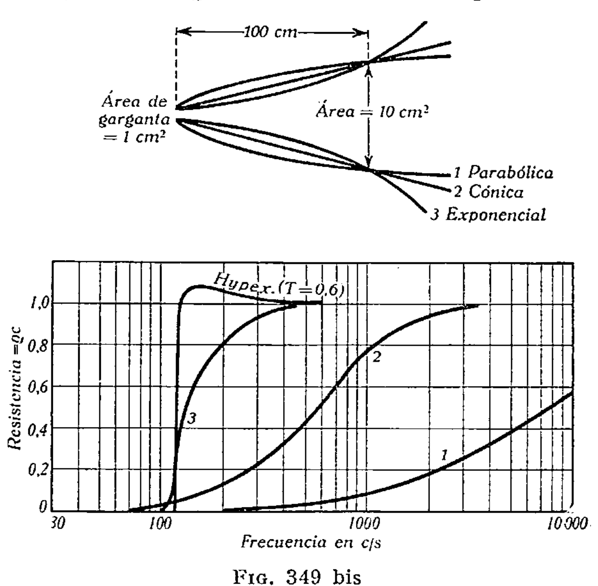


FIG. 349 bis

de bocinas, con igual longitud y secciones extremas, cómo varía la carga de aire sobre el diafragma, en función de la frecuencia; se observa que la exponencial presenta un crecimiento mucho más rápido para la carga que las otras dos, permaneciendo después constante para todas las frecuencias. La expresión de esa carga resistiva del aire tiene, para ella, el valor (²):

$$R = \frac{\varrho c}{s_o} \sqrt{1 - \frac{m^2}{4 k^2}} \quad \text{con} \quad \begin{cases} k = \dfrac{2\pi}{\lambda} = \dfrac{2\pi f}{c} \\ \varrho = \text{densidad del aire} \\ \lambda = \text{longitud de onda} \\ m = \text{coeficiente de crecimiento de la bocina} \end{cases}$$

(¹) Modernamente se construye un cuarto tipo de bocina, la hiperbólica-exponencial o *Hypex* que presenta un crecimiento mucho más abrupto en las proximidades de los 100 c/s que la exponencial.

(²) Un estudio experimental interesante de la curvatura del eje en bocinas exponenciales puede verse en el trabajo de nuestro amigo y prof. de la Universidad de Valladolid S. VELAYOS, *Bocinas exponenciales*, Instituto Nacional de Física y Química, n.° 175 de 1937.

por consiguiente, para una determinada frecuencia de corte $f_c = \frac{mc}{4\pi} = 2730\, m$, se anula dicha carga y, por tanto, por debajo de ella no transfiere al medio ninguna energía sonora; la bocina, pues, actúa como un verdadero filtro de banda alta. La respuesta cae rápidamente para $f_c = 4000$ m, por lo que tomando este valor como la frecuencia más baja a reproducir, la ecuación de la sección de la bocina a la distancia x podrá escribirse:

$$S = S_o\, e^{\frac{f_c\, x}{4000}}$$

De esta expresión se deduce inmediatamente que dos bocinas exponenciales de secciones terminales iguales y distinto factor de crecimiento m deben tener longitudes ligadas a sus respectivas frecuencias de corte por la relación

$$f_c \cdot x = f_c' \cdot x';$$

las *frecuencias de corte varían, pues, en razón inversa de las longitudes*, y, por tanto, cuanto menor sea la frecuencia inferior a reproducir, mayor será la longitud de la bocina, para secciones extremas prefijadas.

Nos queda únicamente por determinar la boca de salida de la bocina, para tener todos los elementos necesarios para el diseño de la misma; el área de esta boca determina la frecuencia más baja que puede transferirse al espacio libre sin que se produzcan resonancias por reflexiones que den lugar a deformaciones en la columna de aire; cuando el diámetro de la boca es $2\lambda/3$, tales resonancias son despreciables y no llegan a ser excesivas, mientras el diámetro de la misma se conserve inferior a $\lambda/4$. La boca de la bocina se determina, pues, con esta condición, a partir de la frecuencia más baja que se tenga que reproducir.

Asociación de bobinas y altavoces. Inicialmente, se han empleado en cine sonoro altavoces de cono o diafragma, pero en razón de las limitaciones que tanto los altavoces como las bocinas presentan en la gama de frecuencias a reproducir, especialmente en los extremos de la misma, y de las propiedades directivas de ambos, sobre todo en las altas frecuencias, los sistemas han evolucionado; el primer paso lo dió Western con su sistema Wide Range, en el que la gama se dividía en tres secciones: una para las altas, que era reproducida por un altavoz de muy pequeño diafragma *(tweeter)* con una bocina corta exponencial; las medias, con uno también de diafragma, pero de mayor diámetro y la correlativa bocina también exponencial, y las bajas, con uno o más altavoces de cono, estos últimos montados en un *baffle* de dimensiones adecuadas; un filtro separador, o red divisora de frecuencias, se encargaba de enviar la sección correspondiente a cada uno de aquéllos, pero el ajuste encaminado a evitar retraso de fase entre las tres bandas era tan laborioso, que hoy día el sistema se ha simplificado seccionando la gama total en dos: una

de altas frecuencias, que abarca normalmente de 300 c/s hasta los 8000 c/s y reproducida por unidades especiales de diafragma, y otra desde los 40 ó 50 c/s hasta los 300 c/s, que reproducen altavoces de cono, con lo que aquellas dificultades de ajuste se reducen grandemente. Con el fin de adaptar las características de dirección al recubrimiento total del área de audición, la unidad de alta frecuencia lleva una bocina celular, que, como veremos, evita la concentración en el eje de las altas frecuencias, y la unidad de baja frecuencia lleva una bocina replegada

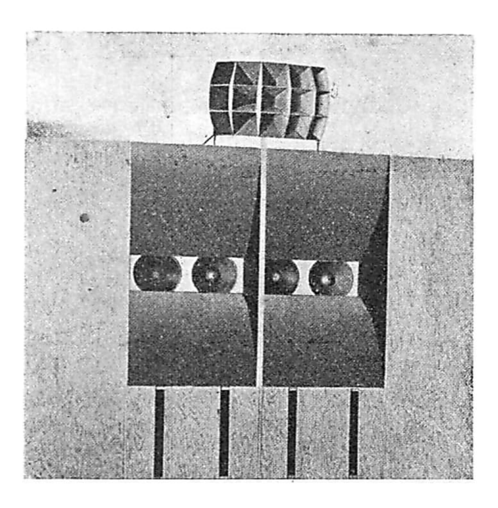


FIG. 350. Conjunto de altavoces Duophonic para salas grandes

para reducir el espacio ocupado en el escenario, terminada en un *baffle*, lo que da un rendimiento muy notable en las bajas frecuencias. Tales sistemas son hoy casi exclusivamente empleados por firmas tan importantes como Western y R.C.A. y seguidos de cerca por otros de menor importancia, e imitados por casas nacionales, pero sin las ventajas indicadas por defectuosa construcción de los altavoces propiamente dichos. La figura 350 muestra el tipo de altavoces Duophonic utilizado en los equipos Westrex de la Western, lanzados después de la segunda guerra mundial, y que constituyen la última palabra, en este aspecto. Los conos son de campo magnético muy intenso obtenido por un procedimiento especial (¹), y con ello se ahorran los inconvenientes prácticos de la alimentación, lo que supone una gran economía en conductores, válvulas y otros materiales, y el mismo sistema de excitación se utiliza en los de diafragma, de altas frecuencias sistema Altec-Lansing.

Unidad de baja frecuencia. Esta unidad consiste esencialmente en una bocina exponencial con una superficie de boca de 50 pies cuadrados (4,65 m²) y una longitud axil de 40 pulgadas (1,02 m), exci-

(¹) Aleación conocida como Alnico n.° 5.

tada por cuatro unidades de cono de diseño especial de 15″ (38 mm). La boca de la bocina termina en un plano-pantalla *(baffle)* de 3,05 por 3,66 m (10′ por 12′). El papel del cono está laqueado para impedir que absorba la humedad, lo que podría modificar la respuesta. Estas unidades están conectadas en serie-paralelo para que den la impedancia característica precisa, así como para asegurarse del funcionamiento del sistema en el caso de fallar alguna unidad. La densidad de distribución es uniforme sobre un ángulo de 50° a cada lado del eje. El empleo de una bocina en lugar de un *baffle* plano tiene las siguientes ventajas: la eficacia se eleva desde un 10 ó 15 % a más de un 50 %, cuyo efecto es una enorme reducción en la potencia del amplificador; además, la radiación indeseable de detrás de las unidades es considerablemente reducida, con el resultado de que el sostenido perjudicial *(hangover)* de bajas frecuencias originado usualmente en el escenario, es prácticamente eliminado. A fin de hacer más compacto y rígido el conjunto de la unidad de baja frecuencia, ésta puede ser replegada y su característica se mantiene si la longitud del conducto de aire no se altera; esta modificación ha sido desarrollada por Olson de la R. C. A. La carga que origina la columna de aire de la bocina decrece la excursión del diafragma, en comparación a la que se produciría con un *baffle* plano acoplado directamente y correlativamente la correspondiente deformación (fig. 351). Con este diseño se mantienen longitudes aproximadamente equivalentes para las longitudes de las dos bocinas de alta y baja frecuencia, y, por consiguiente, no hay retraso de tiempo entre las componentes de sonido de una y otra unidad, que haría perder la coherencia de imagen y sonido de que hablaremos en el capítulo siguiente ([1]).

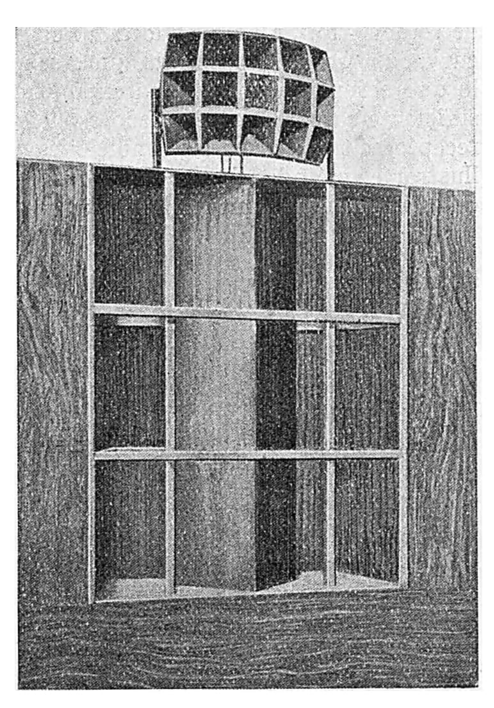


FIG. 351

([1]) El sistema que describimos, y al cual se refieren los párrafos siguientes, representado en la figura 351, era el utilizado en los equipos Microphonic; hoy día han sido reemplazados por el de la figura 350, de los equipos Westrex.

Idea del diseño de la bocina exponencial de baja frecuencia. Fundamentalmente, el diseño de una bocina exponencial de baja frecuencia es el mismo que para una bocina de alta frecuencia; hay, no obstante, una mayor tolerancia en las desviaciones de los valores teóricamente calculados, tales como: rapidez de expansión (que gobierna el valor de la frecuencia de corte), tamaño de la embocadura y naturaleza de la sección recta. Todas las discontinuidades que deben eliminarse en alta frecuencia pueden tolerarse, con muy pequeñas pérdidas, en bocinas de baja frecuencia. Numerosas pruebas han comprobado la verdad de este aserto. Se ha elegido una bocina de sección recta longitudinal curvada, porque ello permite un diseño de bocina más compacto que lo que permitiría una bocina exponencial recta. Se ha proporcionado suficiente carga en un pequeño espacio, lo que permite al cono de los receptores trabajar en las condiciones de óptima eficacia. Con el fin de ilustrar el método, damos un breve sumario del seguido en el cálculo de una bocina exponencial recta:

La frecuencia de corte se elige igual a 50 c/s, lo que corresponde a una longitud de onda de $\lambda = \frac{344}{50} = 6{,}8$ m (271″). La dimensión mínima en el área de la embocadura de la bocina debe ser a lo menos un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia más baja que se desee transmitir; así, pues, este valor para la bocina en cuestión será de 1,72 m. El tamaño de la garganta debe ser el suficiente para acomodar cuatro altavoces de cono de 15 pulgadas; se ha elegido una garganta de 76 por 76 cm (30″ × 30″).

Experimentalmente, se encuentra que una bocina cuya superficie o área de una sección recta se haga doble cada 30,48 cm (12 pulgadas), tiene una frecuencia de corte de 64 c/s, otra que lo haga cada 15,24 cm (6 pulgadas) tiene una frecuencia de corte de 128 c/s; siendo, pues, inversamente proporcionales, según vimos antes, se tendrá para la frecuencia de corte de 50 c/s:

$$\frac{64}{x} = \frac{50}{30{,}5} \quad ; \quad x = 39{,}01 \text{ cm } (15{,}36'')$$

Siendo ahora $S_x = S_o\, e^{Mx}$ la ecuación de la bocina exponencial, se puede determinar fácilmente el valor de M tomando la condición:

$$S_x = 2\, S_o \quad ; \quad 2 = e^{M\,15{,}36} \log 2 = M \times 15{,}36 \times \log 2{,}7182,$$

de donde $M = 0{,}045$; con ello, la sección de la bocina a una distancia cualquiera x de su garganta, vendrá dada por:

$$S_x = S_o\, e^{0{,}045\,x} \quad S_o\, e^{0{,}1143\,x}$$

(según se expresen las distancias en pulgadas o cm), y, por consi-

guiente, la longitud de la bocina para una embocadura mínima antes determinada de 76 × 76, vale:

$$172^2 = 76^2 e^{0,045\, x} \quad ; \quad x = 92,08 \text{ cm} \left(36 \frac{1}{4}\right)''$$

La práctica, no obstante, enseña que aunque los valores anteriores son satisfactorios desde el punto de vista teórico, un incremento en la carga proporciona mejor eficacia o rendimiento; y un incremento en longitud hasta $x = 44$ (1,117 m) proporciona una embocadura de $80''^2 = 516$ cm², que es prácticamente el más adecuado. Con ello, la longitud total, incluyendo los receptores, alcanza el valor de 55″=1,40 m aproximadamente. Tal longitud es muy superior a la que las dimensiones medias de fondo del escenario aconsejan en el promedio de las instalaciones teatrales, y es ésta la razón de haber adoptado bocinas curvadas o replegadas como la mostrada en sección longitudinal en la figura 352; con ella es posible mantener las ventajas de la carga óptima en un espacio mínimo. Pero como se ve, es prácticamente algo distinta de una verdadera bocina exponencial, cuya construcción es mecánicamente impracticable. Para esto se parte de una garganta y una embocadura, como la de la correspondiente bocina exponencial antes calculada, tomando también la misma constante de crecimiento M, se buscan secciones intermedias tan próximas como sea posible a las correspondientes de la bocina exponencial, pero de tal modo que no ofrezcan dificultades constructivas; de esta forma, en la práctica, las diferencias en la respuesta son tan pequeñas, que justifican plenamente la desviación teórica, en vista de la economía.

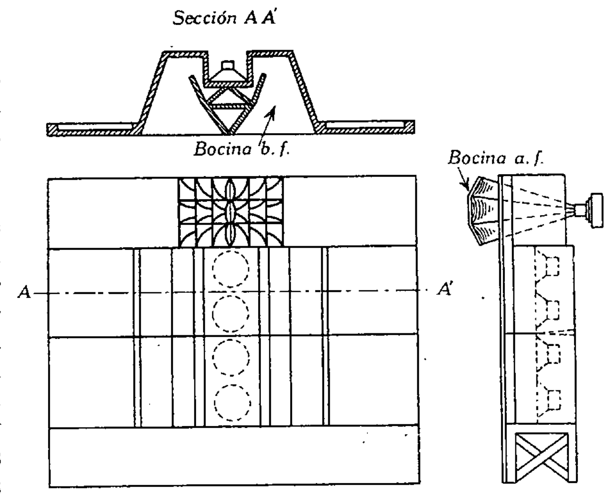


Fig. 352. Sistema de Shearer de bocinas (Two-way horn)

Unidad de alta frecuencia. Una de las limitaciones de las instalaciones de reproducción sonora en teatros, es su mala característica direccional. La bocina exponencial normal tiene una directividad que varía con la frecuencia; el sonido de baja frecuencia se proyecta casi

uniformemente dentro de un ángulo muy abierto, pero a medida que crece esta frecuencia decrece rápidamente aquel ángulo (fig. 346), hasta que, a una frecuencia de varios miles de ciclos, toda la energía se radia en un haz estrecho; el resultado es que la reproducción del sonido se hace predominantemente en *bajos (bassy* o *drummy)* para los asientos que se encuentran muy desviados del eje de la bocina, mientras que sucede lo contrario para los que se encuentran directamente en dicho eje o en sus proximidades. Mediante el sistema celular, este defecto se elimina utilizando un sistema radiante para la unidad motora de alta frecuencia, compuesto de un haz o racimo de pequeñas bocinas exponenciales, cada una de las cuales tiene una boca de 60″ cuadradas aproximadamente (unos 387 cm²). Estas bocinas elementales son apiladas en capas, para formar una gran bocina cuya boca tiene forma esférica; el principio de este tipo de unidad de alta frecuencia puede considerarse como un desarrollo avanzado y más compacto del clásico haz de altavoces, empleado normalmente y de antiguo en Auditorums y Sistemas de Megafonía, Stadiums, etc., excepto que el haz de bocina se alimenta desde un origen común, constituído por dos motores dinámicos o altavoces de diafragma. Como las bocinas de referencia en los sistemas antes citados se diseñan con ángulos de abertura muy pequeños si se excitan con unidades motoras individuales, no adaptables a teatros en que se precisa más de una bocina para el total recubrimiento del área de audición, podrían originarse distribuciones no uniformes, así como pérdidas de recubrimiento de algunas zonas, si por cualquier causa fallase una de las unidades durante la representación.

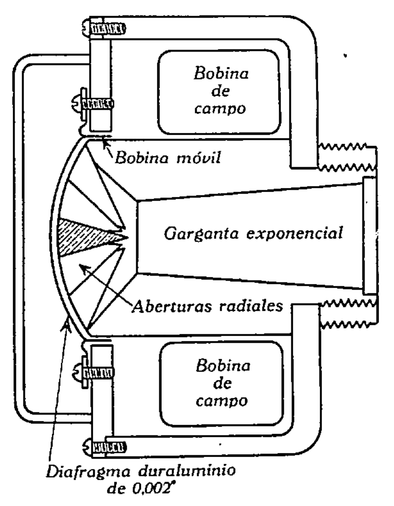


Fig. 353. Receptor de a. f. Lansing n.° 285

Una de las ventajas del sistema de referencia es el empleo de un solo diafragma al objeto de reducir la deformación por defasaje; pero como en la mayor parte de los teatros se precisa funcionamiento en paralelo para protegerse contra el caso eventual de avería de una unidad motora, se disponen dos de éstas en una embocadura o garganta en Y, pues la experiencia demuestra que la deformación de fase producida por esta causa es despreciable.

Los diafragmas son de duraluminio de 0,002″ (0,0508 mm) de espesor y una superficie de 38,7 cm²; van montados en la parte posterior de la unidad motora o receptor, y mediante una abertura anular el sonido alcanza la garganta en Y con el mínimo de deformación (fig. 353).

Para reducir todavía más esta deformación, la garganta tiene una forma exponencial, que comienza en la abertura circular y evita la discontinuidad brusca que se produciría con gargantas cilíndricas. Dos receptores conectados a cada garganta en Y, y ésta al conjunto de todas las bocinas celulares, tienden a reducir la deformación de gargantas de alta presión. El campo de excitación precisa unos 25 W por unidad.

Para obtener un gran rendimiento en la transferencia de energía, entre el diafragma y la columna de aire en las bocinas exponenciales de altavoces, la impedancia acústica del aire debe equilibrarse con la impedancia mecánica del diafragma. Tal equilibrio de impedancias se obtiene mediante un transformador acústico formado por una pequeña estrangulación adecuada en el área de su sección recta, entre el diafragma y la garganta de la bocina en el conducto de aire, según se ve en la figura 353. Mediante este equilibrio de impedancias se origina una carga sobre el diafragma que puede tomarse como la relación del área efectiva del diafragma al área de la sección de estrangulamiento, lográndose así un amortiguamiento de la resonancia del diafragma y proporcionando una carga lo más uniforme posible sobre su área total.

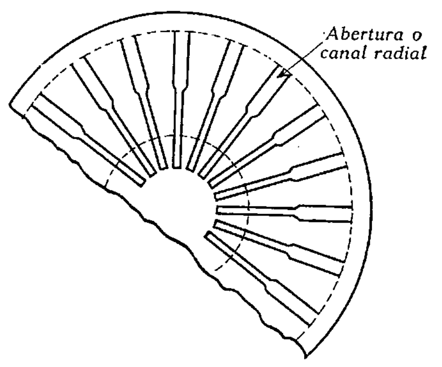


FIG. 354. Estructura radiada del transformador acústico correspondiente a una unidad de alta frecuencia Lansing nº. 285

Las dimensiones longitudinales entre el diafragma y la garganta de las bocinas deben ser tales que las ondas de cualquier frecuencia dentro de la gama de sonido a reproducir, que proceden simultáneamente de los diferentes puntos del diafragma, no alcancen ningún punto de la garganta, en oposición de fase, porque entonces se producen interferencias entre ellas con el consiguiente efecto destructivo. Se precisa también que las ondas que se originan en los puntos del diafragma, a lo largo de un elemento radial, o sector del mismo, formen un frente de onda de forma adecuada a la de la garganta de la bocina.

Un método para evitar los efectos de interferencia entre las ondas originadas en el centro y en la periferia del diafragma, consiste en disponer canales individuales de sonido de la misma longitud substancial, desde el diafragma a la garganta de la bocina, lo que representa transformadores acústicos formados por un cierto número de conductos concéntricos anulares para el paso del sonido, de la misma longitud aproximada; tal sistema se ha mostrado práctico y de buena calidad, pero de difícil y elevado coste, por lo que se ha reemplazado por otro sistema (fig. 354), en el que se muestra el aspecto del transformador

desde el diafragma, el que resulta fuerte, barato y de relativa facilidad constructiva. Este transformador proporciona canales de sonido dispuestos radialmente de modo que cada abertura subtienda un sector del diafragma; las ondas que se originan a lo largo de un sector radial del diafragma pasan por cada canal sonoro sin experimentar alteración, y avanzan a lo largo de éste sin experimentar nueva subdivisión, alcanzando el plano de la estrangulación de la garganta en forma aproximadamente esférica, no produciéndose anulación interferencial, en tanto que la máxima distancia de un punto del diafragma a la salida del canal sonoro más próximo sea menor que un cuarto de la longitud de onda de la más alta frecuencia a reproducir. Tal tipo de altavoz, provisto de transformador acústico, está representado en la figura 353 y reproduce con un alto nivel de uniformidad las frecuencias entre 300 y 10 000 c/s.

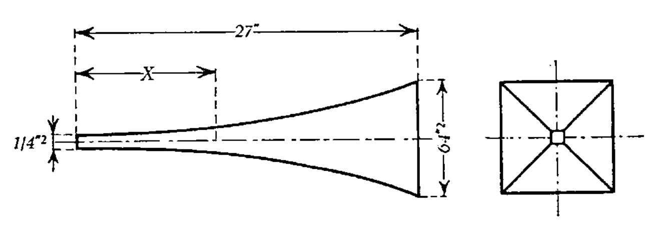


FIG. 355. Bocina elemental de tipo celular

Las características direccionales de tal unidad son muy satisfactorias para instalaciones de reproducción en teatros; conviene, sin embargo, hacer notar que la falta de una buena distribución no puede corregirse por igualación en los circuitos eléctricos, ya que para un ajuste dado, la respuesta total es una función grandemente variable de la posición en la sala; aunque tal característica pueda ser plana para una posición de la sala, puede no serlo para todas y aún para una gran parte de la sala, con tal sistema.

Datos de diseño de la bocina exponencial de alta frecuencia. La especificación de ambos tipos de bocinas de alta y baja frecuencia impone la condición de que ambas no excedan en profundidad o longitud las dimensiones medias disponibles en un escenario normal, es decir, unos 44″ (1,20 m). Esta limitación de la longitud trae consigo otra en la selección de la frecuencia de corte a unos 220 c/s, cuyo valor permite el diseño de bocinas que cumplan con requisitos indispensables, tales como difusión de las altas frecuencias en un ángulo de 90 ó 105°, con un máximo de seis bocinas separadas, y un tamaño razonable de la embocadura para que se tenga una discontinuidad despreciable en la salida de la bocina. He aquí un breve sumario de los cálculos (fig. 355).

Igual que antes, la frecuencia de 220 c/s nos determina x por la proporción

$$\frac{64}{x} = \frac{220}{30{,}5} \cdot 30{,}5 = 12'', \qquad \text{de donde } x = 8{,}89 \text{ cm } (3{,}5'')$$

mediante la ecuación de la bocina $S_x = S_o\, e^{Mx}$ y tomando $S_o \simeq$ $\simeq$ 1,61 cm² = 1/4 de pulgada cuadrada, $1/2 = 1/4\, e^{3,5\,M}$, de donde $\left\{ \begin{matrix} M = 0,2 \\ M = 0,508 \end{matrix} \right\}$ (según sean pulgadas o cm),

y, por tanto, la ecuación de la bocina será

$$S_x = S_o\, e^{0,2\,x} = S_o\, e^{0,5 \cdot x}$$

Montaje de las bocinas. La bocina replegada se monta en secciones, y cada sección contiene dos altavoces, pudiendo apilarse una sobre otra, lo que depende del número de ellas necesario. Cada sección es conveniente para una salida de amplificador de 25-30 W, con el fin de obtener la menor deformación posible por contenido en armónicos; cuando se desea una distribución lateral muy amplia, las secciones pueden colocarse una al lado de la otra. La figura 352 muestra en la sección AA' la construcción de la bocina.

El conjunto de las bocinas se monta de modo que la unidad de alta frecuencia se encuentre a 50 ó 60 % aproximadamente de la altura de la pantalla; esta posición se ha mostrado, después de la experiencia de algunos años, como el centro de actividad o *presencia* de la acción desarrollada en la pantalla, y puesto que las altas frecuencias son las que realmente determinan esta presencia, deben disponerse en esa posición. A fin de mantener el sonido tan aproximadamente como sea posible originario de un solo foco, la unidad de baja frecuencia se mantiene cerca de la de alta frecuencia.

Directividad. Tanto para la unidad de alta como para la de baja frecuencia hace falta una cierta directividad, puesto que la mejor ilusión se logra si la relación del sonido directo al reflejado es la mayor posible; en muchas salas de teatros debe existir muy poca energía radiada a ángulos mayores de 45° del eje, porque si no, como esta energía es reflejada por las paredes de la sala, se pierden las características de la ilusión de la escena. Además, hay otra consideración en relación con esta característica; Knudsen ha mostrado que a las más altas frecuencias, como 10 000 c/s, la absorción de la atmósfera puede ser tan grande como 0,2 dB por pie (30,5 cm), bajo ciertas condiciones de humedad y temperatura. En teatros grandes y largos, ello origina una seria pérdida en los asientos alejados de la pantalla; el efecto puede ser considerablemente reducido, aumentando las radiaciones de alta frecuencia de las unidades celulares que sirven aquellosa sientos. Esto puede hacerse poniendo una cantidad conveniente de material absorbente en las otras unidades celulares y reigualando para dar la respuesta total standard en los asientos frontales o inmediatos a la pantalla; estos artificios, no obstante, no son necesarios en la mayoría de los teatros.

Deformación por armónicos. El mayor defecto de los altavoces comerciales es su gran deformación en amplitud por armónicos, y una de las características esenciales del nuevo sistema es su limpieza en la reproducción de las altas frecuencias; su contenido en armónicos es menor del 4 % a 40 c/s para 30 W de salida. Esto es debido, en gran parte, al empleo de un cono relativamente grueso y comparativamente blando, que puede desplazarse en su recorrido total, sin deformarse ni romperse, y, por tanto, sin producción de armónicos. Se ha podido comprobar que para un tono puro de 40 c/s, muchos de los altavoces comerciales de cono dan una mayor aparente sonoridad que el altavoz finalmente adoptado. Sin embargo, cuando se hace una comparación directa conmutando el amplificador, de la nueva unidad a otra bajo prueba, se observa que mientras la nueva unidad da solamente el tono puro de los 40 c/s, la otra da, en muchos casos, casi exclusivamente el 2° y armónicos superiores de aquel tono; las medidas acústicas de la salida llevadas a cabo muestran que a pesar de su aparentemente baja sonoridad, la salida del tono puro era 6 dB superior al de los otros altavoces. Este gran incremento en la sonoridad aparente originado en aquellos altavoces, a causa de la transferencia de una parte de la energía del fundamental a aquellos armónicos, es indudablemente lo que da la explicación de la aparente alta eficiencia de todos los altavoces actuales. La mayor sonoridad de los armónicos no puede ser debida al rápido cambio de sensibilidad del oído en las bajas frecuencias, que favorece a los armónicos a costa del fundamental (fig. 157), puesto que esto mismo ocurriría en frecuencias más altas para las que la sensibilidad del oído varía en sentido opuesto con la frecuencia. Con un par de unidades probadas, aquel efecto fué particularmente más notable entre 1000 y 2000 c/s que para otra frecuencia cualquiera; y es igualmente grande con sonidos complejos, como la conversación y la música, aunque aquí el cambio en calidad es algo menor, con respecto al cambio en sonoridad aparente, que en el caso de un tono puro.

Fase. Otra importante ventaja del nuevo sistema es que llena fácilmente las condiciones para que todos los focos virtuales de las componentes del sonido reproducido coincidan en un plano vertical; tal condición es imposible con sistemas de gama dividida en que la longitud axil de las distintas bocinas de un sistema son muy diferentes, y en este respecto importa decir que es más fácil ajustar un sistema de dos que de tres canales (Microphonic de Western, por ejemplo). Podría pensarse que, puesto que el tiempo de retardo de unas bocinas respecto a otras de un equipo es muy pequeño, del orden de algunos milisegundos, el efecto debería ser inapreciable; esto es cierto para determinados tipos de sonido, como son todos los pasajes sostenidos, pero para el diálogo y especialmente ciertos tipos de efectos sonoros que tienen naturaleza de cortos impulsos, se observa una deformación muy perjudicial. Una demostración muy notable de ello se obtiene regis-

trando una música o danza de palmas o golpes secos; cuando se reproduce esta música con sistemas, con un tiempo de retardo muy pequeño se obtiene una gran naturalidad, mientras que con sistemas que tienen un tiempo apreciable, la escena se reproduce con pérdida de realismo; el sonido no parece proceder de la pantalla y, además, las palmas y golpes secos parecen *desgarrados* con un bien marcado eco. El efecto es muy semejante a la deformación transitoria que se produce cuando

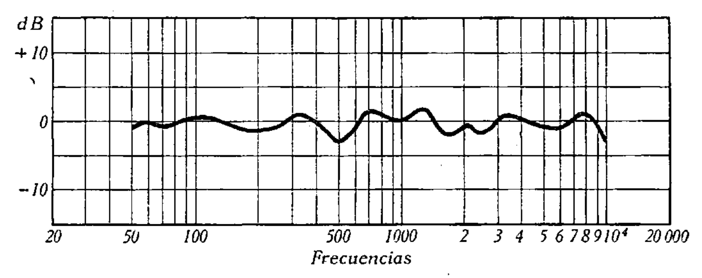


Fig. 356. Respuesta total del sistema Shearer (two-way), tomada en el eje normal y a 10 pies de las bocinas

se emplea un filtro de corte muy agudo (la pendiente entre su banda de atenuación y la de transmisión es muy rápida), y aún más al efecto de *eco* que se observa en ciertas líneas largas telefónicas con redes correctoras de fase.

A este respecto importa hacer notar que la respuesta en frecuencia total del sistema no debe caer demasiado rápidamente más allá de las frecuencias de corte, con el fin de evitar la deformación por transitorios, que por esta causa pueda resultar, según se indicó al hablar de la deformación en general. Probablemente, la máxima pendiente que puede tolerarse es del orden de 20 dB por octava, es decir, la que tiene aproximadamente una sección de un filtro de constante K (se llaman así los que su impedancia serie y paralela cumplen la condición de ser inversas respecto a K y no resistivas, es decir, $Z_1 \cdot Z_2 = K$).

Todas las medidas efectuadas con sistemas de este tipo se han realizado en un escenario de $100' \times 70' \times 35'$, y con un tiempo de reverberación de un segundo a 512 c/s, y con un aislamiento de ruidos exteriores de 60 dB, proporcionado por las condiciones del local bajo prueba; las respuestas se midieron con un indicador de volumen de gran velocidad capaz de responder a un cambio en nivel de 300 dB por segundo, y bajo la dirección de Shearer de la Metro-Goldwyn-Mayer. La figura 356 da la respuesta media de una serie de medidas.

XX. Comprobación del sistema sonoro y modificación de su respuesta y latitud de volumen

Respuesta total del sistema. Hasta ahora hemos señalado en los capítulos correspondientes la respuesta en frecuencias de cada uno de los eslabones o elementos que componen la cadena desde la célula hasta la salida del amplificador principal o de potencia, de un modo individual; el resultado de combinar todas estas respuestas parciales nos da la *respuesta total* del equipo, que en el fondo es la que tiene influencia decisiva en la reproducción del sonido. No es preciso, pues, que cada respuesta parcial sea perfecta, ya que un defecto en una de ellas, como, por ejemplo, una caída en las altas frecuencias, puede ser evitado dando al paso siguiente una cresta de sentido inverso que compensa aquella caída, lo cual permite, en la respuesta total, un coste más económico que si quisiéramos lograr la respuesta final desde el principio y en cada paso sucesivo.

Cuando se trata de determinar esta respuesta total y se desea modificarla de modo que sea la más adecuada a la reproducción más exacta del sonido, se presentan una serie de problemas, algunos de los cuales ya hemos insinuado en el Capítulo X. El procedimiento práctico empleado para determinar la misma consiste en desconectar la carga del amplificador de potencia formada por los altavoces, etc., y conectar un indicador de volumen calibrado en decibelios, mientras que a la entrada del sistema se aplica una excitación constante para toda frecuencia, de entre varias repartidas en toda la gama que el sistema debe reproducir; tal excitación suele ser, en nuestro caso y con el fin de poder ajustar, si ello es preciso, todos los elementos del sistema de transmisión, una película de pruebas convenientemente tarada.

Importa tener en cuenta, no obstante, que las lecturas del indicador de volumen vienen dadas en decibelios, y que dichas lecturas no responden a la sensación de sonoridad del oído, según vimos en el Capítulo X, para lo que sería necesario que dichas lecturas fuesen dadas en phons, y que la respuesta de dicho aparato fuese sensiblemente la de nuestro oído; de otra manera, examinando la figura 357, se observa que, en las bajas frecuencias, la pendiente de la respuesta auditiva es

de unos 12 dB por octava hasta los 800 c/s y para unos 20 phons, en lugar de ser horizontal, como sería el caso si la respuesta fisiológica respondiese a la potencia acústica. Un amplificador cuya respuesta en decibelios fuese inversa de la correspondiente a esos 20 phons, en la figura elevaría la curva de los 20 phons a la marcada de puntos, y su ganancia para distintas frecuencias expresadas en decibelios serían las diferencias de ordenadas entre ambas curvas para cada frecuencia, cambiadas de signo, es decir:

Ciclos por segundo	30	100	300	1000	3000	10 000
Ganancia en dB	—10	8	28	42	48	42

Un amplificador de tal naturaleza se llama *amplificador compensado (weighted)* y tiene una respuesta sensiblemente igual a la del oído humano, pero invertida, por lo que, para él, las desviaciones del indicador de volumen, cambiadas de signo, darían valores en phons o unidades fisiológicas, para una excitación constante. Su uso es ventajoso, no cuando se trata de determinar la respuesta de los equipos sonoros, sino para predecir la influencia perjudicial que un zumbido propio a un elemento cualquiera puede tener en la reproducción del sonido, ya que su efecto es distinto según la frecuencia del mismo, aun cuando diste del sonido correspondiente a esa frecuencia en la respuesta del amplificador sin compensar, el mismo número de decibelios y en todas las frecuencias, lo que evidentemente no se puede apreciar con un decibelímetro. En tales casos, el amplificador compensado se intercala entre el amplificador a estudiar y el decibelímetro (indicador de volumen); de él hicimos mención en el Capítulo X.

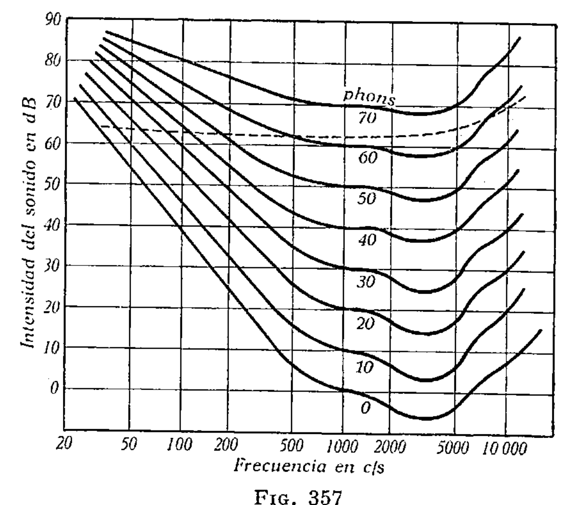


FIG. 357

Esto explica también la tendencia moderna de no crear una respuesta total horizontal, con desviaciones de $\pm$ 3 dB con respecto a la lectura de los 1000 c/s, como era hasta hace poco la práctica usual, y el porqué de las llamadas *curvas con hombros* de que después hablare-

mos, que en cierta aproximación dan la inversa de la curva de nivel fisiológico en la figura 358.

Pruebas de calidad del equipo [1]. Las tres cosas de más interés, cuando se trata de comprobar el funcionamiento del equipo (y no es el mismo el caso de su fabricación), son, como para cualquier amplificador: *a)* el régimen o *punto de sobrecarga*, es decir, cuál es la máxima

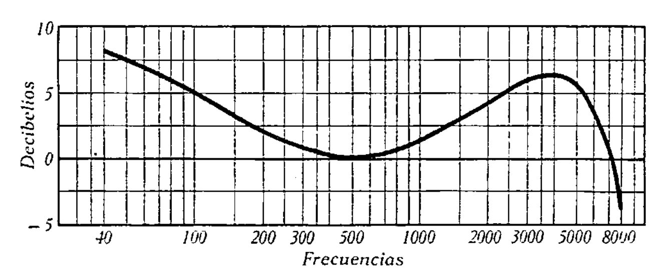


Fig. 358

excitación tolerable sin un exceso de deformación; *b)* cuál es su *respuesta* o, mejor aún, si ésta se mantiene dentro de los límites tolerables, y *c)* cuál es su *ganancia para los* 1000 *c/s* a que se refieren las desviaciones de la respuesta; la determinación del punto de sobrecarga es labor preliminar a la determinación de la respuesta, pues de otro modo ésta puede quedar enmascarada por haber rebasado para alguna frecuencia la excitación tolerable dentro de la cual el sistema amplificador es lineal; es decir, la salida se mantiene proporcional a la entrada, que implica la no existencia de armónicos, y es también preliminar a la determinación de su ganancia; el conjunto de aquellas tres pruebas se designa a veces con el nombre de *pruebas de transmisión*.

Siempre que se efectúa la prueba de transmisión de un equipo, debe tenerse en cuenta la influencia de cada uno de los elementos o eslabones en la respuesta total, y no sólo éstos, sino incluso la de los elementos que constituyen cada uno; así, por ejemplo, la sustitución de un tipo de válvula por otra (incluso del mismo tipo, pero envejecida), el tipo de transformadores utilizados, resistencias, etc., pueden determinar términos correctivos que toman distintos valores según la frecuencia de que se trata. Entre esos eslabones merecen citarse como más importantes:

1. El sistema óptico.
2. La célula fotoeléctrica.
3. El amplificador previo.
4. El amplificador general, incluído el de potencia.

---

[1] No incluímos aquí la determinación del *flutter* porque la mayoría de los equipos nacionales quedarían, en este aspecto, en mala situación, ya que no se atiende a esta característica.

5. Finalmente, el factor de corrección del indicador de volumen, cuando su respuesta no es lineal y se utiliza con carga distinta de aquella para la que ha sido calibrado, de que ya hablamos en el Capítulo XIV.

Con todos estos términos correctivos agregados para cada frecuencia a las desviaciones del indicador de volumen para el sistema total, se determina la desviación con respecto a los 1000 c/s y se puede saber en el momento oportuno, como indicamos después, cuál es la respuesta y ganancia del sistema.

a) Para efectuar la *prueba de sobrecarga* se requiere, además del indicador de volumen, un atenuador calibrado en decibelios, que nos permita ajustar la excitación por pasos, el cual se intercala delante o a la entrada del amplificador principal, mientras que a su salida se conecta siempre el indicador de volumen.

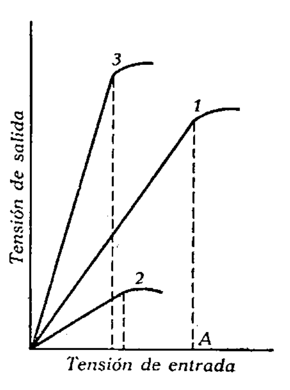


FIG. 359 bis. Punto de sobrecarga

Como es bien sabido, todo amplificador tiene una tensión de salida que es sensiblemente proporcional a la de entrada o excitación, para toda la zona en que no hay deformación: mas precisamente, el amplificador comienza a estar sobrecargado apenas deja de ser rectilínea la línea que da la característica tensión de salida frente a la tensión de entrada (fig. 359 bis), y precisamente la curvatura de la misma da lugar a la aparición de armónicos y deformaciones de que hemos hablado en el Capítulo XV. Como la determinación precisa del punto *A* de sobrecarga es, en general, difícil, pues a escala suficientemente grande, la parte rectilínea puede aparecer curvada, y como, además, para otra frecuencia distinta, la característica de amplificación puede tener distinta inclinación (de modo que el punto de sobrecarga de 1, referido a la tensión de entrada resulte excesivo como en 2 y 3, es decir, la excitación sea demasiado grande), se recurre a imponer dos limitaciones. Primeramente se limita la sobrecarga o contenido en armónicos al 3 ó al 5 %, y en los actuales equipos de reproducción al 2 % del valor del fundamental o frecuencia para la que se efectúa la construcción de la característica, y en segundo lugar, se procura que la excitación sea lo más pequeña compatible con lecturas precisas del indicador de volumen; una buena norma es aproximarse lo más posible a las condiciones de trabajo del amplificador.

Se sigue entonces el siguiente expediente para determinar tal sobrecarga: se gradúa la excitación y el atenuador calibrado (que puede ser el mismo fader cuando éste se encuentra calibrado en decibelios), de modo que la lectura de indicador de volumen sea de 6 a 9 dB por debajo del valor normal en la posición del atenuador a que suele trabajar el amplificador (corrigiendo, cuando sea preciso, previamente

la lectura del indicador de volumen de su término de impedancia), que viene a ser el centro de la característica, para los 1000 c/s. Como excitación se puede emplear, en el caso de los reproductores de sonido, una lámpara ordinaria alimentada con la red de alterna cuya distancia a la fotocélula se gradúa de una vez para todas, de tal modo que en esa posición y con la indicada en el atenuador se obtenga en el indicador de volumen la precitada lectura. Suponiendo que el atenuador está calibrado por pasos de 3 dB, se va elevando el fader, es decir, reduciendo la atenuación paso a paso y comprobando que las lecturas del indicador de volumen crecen en la misma proporción en que se reduce esa atenuación; el punto de sobrecarga se alcanza en el momento en que cesa dicha proporcionalidad, esto es, cuando al reducir *n* dB la atenuación, el incremento de lectura en el indicador de volumen es menor que *n*.

Estamos ya en condiciones de proceder a la determinación de la respuesta de frecuencias o características de transmisión, con tal de situar el atenuador en una posición tal, que con la película de pruebas calibrada o película de frecuencias de que luego hablaremos, ninguna lectura en el indicador de volumen exceda el punto de sobrecarga, o; mejor aún, de modo que la máxima lectura obtenida se mantenga de 2 a 3 dB por debajo de la sobrecarga.

b) Para determinar el *comportamiento del equipo* reproductor con *respecto a las distintas frecuencias* de la gama, caben dos procedimientos, uno de carácter puramente cualitativo o subjetivo y otro cuantitativo, y, por tanto, de mayor valor técnico. Con la primera finalidad, se ha lanzado al mercado, al igual que para la proyección, por la S. M. P. E. de América, una *película de pruebas*, escrupulosamente registrada, que tiene por objeto detectar periódicamente los defectos que subjetivamente pueda presentar un equipo; estas películas comprenden:

1. Registro de voces masculina y femenina, piano y orquesta.
2. Frecuencias fijas, generalmente entre 7000 y 8000 c/s, para el enfoque del sistema óptico del equipo.
3. Frecuencias fijas a nivel constante, para determinar las características del reproductor; gama de frecuencias, *flutter*, ajustes de banda, etc.
4. Bandas de frecuencia registradas en voz y música que alcanzan y se extienden hasta más arriba de los 9000 c/s.
5. Frecuencias de amplitud constante por pasos, desde los 50 hasta los 9000 c/s.
6. Registro en equipo Western Electric Mirrophonic, considerado como el más correcto entre los conocidos. (Después del año 43, esta firma ha superado sus equipos. Mirrophonic, con los Westrex).

Todas estas películas duran unos cinco minutos y se venden a 75 dólares, para las de 35 mm, y para la película subnormal o de 16 mm, al precio de 30 dólares, siendo ambas idénticas en cuanto a su composición, y formando un rollo completo con la de los defectos de

proyección de que hicimos mención anteriormente, en el Capítulo X.

Para pruebas cuantitativas de la respuesta del equipo, se utilizan *películas calibradas* de frecuencias; éstas llevan una serie de trozos de longitud suficiente (unos 3 m) para poder leer con facilidad las desviaciones del indicador de volumen, separadas entre sí por trozos blancos o colas de un metro de longitud aproximada; cada uno de aquellos trozos lleva registrada a nivel constante una frecuencia fija, repartidas todas esas frecuencias a lo largo de la gama que el equipo debe reproducir, y con una mayor profusión en las altas frecuencias donde las pérdidas suelen ser mayores, por ejemplo: 55-130-300-1000-3000-5000-7000 y 8000 c/s; para cada frecuencia se da un término correctivo propio de la copia en cuestión que indica la desviación del nivel registrado a esa frecuencia con respecto a la de los 1000 c/s, teniendo en cuenta no sólo las pérdidas propias que por la anchura inevitable de la rendija óptica se originan al crecer la frecuencia y de que hablamos en el Capítulo XI, sino también las que como consecuencia de las distintas operaciones para la obtención de la copia en cuestión (positiva, revelado, fijado, etc.), se hayan podido producir; de este modo el resultado es el mismo después de tener en cuenta esos elementos de corrección, que si se aplicase para cada frecuencia una excitación constante. También llevan en cabeza una zona registrada a frecuencia fija, normalmente 1000 c/s, pero sin calibrar, cuyo objeto es preparar al experimentador para que comience a anotar las lecturas en el indicador de volumen al empezar a pasar el primer trozo calibrado. De otra parte y como todas las lecturas se refieren a la de los 1000 c/s, cada película lleva además un número que da el valor relativo de la ganancia a los 1000 c/s calibrados, lo que nos permitirá después determinar la ganancia propia del sistema a dicha frecuencia tipo, o comparar la de dos entre sí.

Obsérvese la manera de lograr una respuesta rectilínea dentro de una cierta aproximación, que dimos antes al hablar del amplificador compensado; en él logramos rectificar la curva de sensibilidad del oído a 20 phons sin más que agregar las diferencias de ordenadas de la figura 354 entre esa curva y la horizontal correspondiente a los 1000 c/s cambiados de signo; pues bien, *cualquiera* que sea la respuesta del sistema, puede lograrse situarla horizontal sin más que cambiar de signo a los términos correctores de cada uno de los elementos de la cadena de transmisión, determinados para cada frecuencia, y sumarlos al valor de la respuesta del equipo para esa frecuencia; esto es lo que se hace normalmente con aquellos términos correctivos, puesto que lo que se trata de comprobar no es la forma de la respuesta, sino si ésta, la real, se separa de la nominal en más de 2 ó 3 dB, y ello se consigue con esa rectificación de la respuesta. Si de esa respuesta horizontal virtual se quiere pasar a la verdadera del equipo, bastará cambiar de signo a todos los términos correctivos de los distintos elementos, fotocélula, sistema óptico, etc., y sumarlos con este signo a las desviaciones leídas en el indicador de volumen para obtener la respuesta real

o verdadera del sistema, que puede ser cualquiera y no precisamente horizontal; en resumen: no interesa (cuando, como es el caso, se trata de comprobar el equipo) la forma de la respuesta efectiva, sino sus desviaciones de la nominal especificada por el fabricante; por eso aquellos términos correctivos vienen dados con sus signos cambiados (excepto para la película), y la respuesta virtual obtenida con ellos es siempre sensiblemente horizontal.

c) Finalmente, nos falta comprobar si la *ganancia total del sistema* a 1000 c/s es la que especifica el fabricante con las tolerancias admisibles, y para poderla expresar en decibelios, hace falta conocer el valor de la excitación; aquélla se obtiene a partir de las lecturas obtenidas a dicha frecuencia en la determinación de la respuesta, teniendo en cuenta: el sumando correctivo de los 1000 c/s calibrados en la película de prueba (que depende de la excitación), la atenuación en decibelios del Fader o atenuador en la posición en que se efectúan las pruebas, y los que afectan a cada uno de los eslabones de la cadena del sistema, así como el término de impedancias del indicador de volumen.

Cuando estas tres pruebas nos dan resultados todos comprendidos dentro de las tolerancias especificadas por el fabricante, se podrá dar por bueno el funcionamiento del equipo, pero en otro caso habrá que proceder a ajustar y comprobar cada elemento, comenzando por la fotocélula, sistema óptico, previo, etc., y cerciorándose de que dentro de cada elemento, válvulas, transformadores, etc., no originan para alguna frecuencia pérdidas excesivas o bien no se produce por alguna causa una ganancia anormal. El hecho de poseer cada equipo dos máquinas, con sus previos y cabezas de sonido correspondientes, nos ayuda en gran medida a la discriminación del elemento perturbador por simple cambio sistemático de elementos; por otra parte, debe cuidarse que la diferencia de nivel entre ambas máquinas se mantenga dentro de un cierto margen, también especificado en la mayoría de los casos.

Observación. Además de las películas de pruebas antes mencionadas, existen otras películas más o menos prácticas destinadas al ajuste de posición acimutal de la rendija y enfoque del sistema óptico; de todas ellas, la más práctica es una en la que se ha registrado una frecuencia de 8000 c/s a nivel constante, la cual se cierra en forma de *bucle*, mientras se hace el ajuste.

Medios de modificar la respuesta del equipo reproductor. Hasta hace relativamente pocos años, la tendencia más general en los equipos de reproducción sonora de cines era mantener la respuesta en decibelios lo más plana y horizontal posible con respecto a los 1000 c/s, con una tolerancia de ± 3 dB; sin embargo, hay una serie de razones (1) que abogan actualmente por dar a tal respuesta otras formas caracterizadas en su gran mayoría por una elevación en las frecuencias altas y las bajas con respecto a las medias, como son, por ejemplo, la obtención de nuevos efectos artísticos, la compensación de ciertas caracte-

(1) En el caso, por ejemplo, de registro en disco, la respuesta debe ser creciente con la frecuencia.

rísticas acústicas del equipo o de la sala, la reducción del ruido de fondo o zumbido de determinada frecuencia del equipo, etc.; ello da lugar a un tipo de respuesta que se ha venido llamando *curva con hombros* debido a aquella elevación en las altas y bajas frecuencias, de la cual es un ejemplo típico la curva de la figura 358; este tipo de curvas se llama también de tipo Mirrophonic por haber sido empleadas por primera vez por esos equipos Western. La medida según la cual se elevan esas crestas extremas con respecto a las medias frecuencias, así como las frecuencias a que se realizan esas crestas, depende esencialmente de tres características: de la respuesta de los altavoces propiamente dichos, de las características del local y de la respuesta del oído. Todo circuito destinado a elevar las bajas frecuencias se llama *circuito de compensación de bajos (bass-boost circuits)*, mientras que para las altas se llama *circuito de compensación de las altas (trebble compensation circuit)*.

Respecto a la respuesta de los altavoces, ya hemos hablado con anterioridad en el capítulo dedicado a ellos, y de la respuesta del oído también, y más adelante completaremos lo dicho; en cuanto a las características del local, veremos en el momento oportuno que la acústica del mismo puede ser de tal naturaleza que favorezca o atenúe con exceso determinadas frecuencias, las cuales se precisa compensar con la respuesta del equipo en sentido inverso, y, naturalmente, sólo puede hacerse en cierta medida, ya que, como veremos más adelante, un medio auxiliar que contribuye a mejorar la audición lo constituye el tratamiento o recubrimiento de las paredes del local con materiales acústicos adecuados y la característica de absorción de éstos contribuye en cierta medida a la respuesta *aire a aire* (micrófono a altavoz).

Refiriéndonos a los medios para dar una forma adecuada a la respuesta del equipo, existe el ya clásico empleo de igualadores, de los que dimos unas ideas en el Capítulo XVI. En la figura 360 se muestra una aplicación de este sistema controlable manualmente, utilizando igualadores formados por una resistencia en serie con un circuito de una L y una C en paralelo, y que como es fácil mostrar (Capítulo XVI), tiene una pérdida de inserción con un valle y son, por tanto, aptos para elevar una determinada frecuencia; la resistencia variable tiene por finalidad atenuar la resonancia del circuito en L y C tanto más cuanto menor sea el valor de la resistencia. A este tipo de igualación se le llama también *compensación manual de tono.*

Cálculo de la compensación de los bajos. Examinando las curvas de la figura 357, que nos dan los niveles fisiológicos de audición, se ve que al disminuir el nivel de reproducción, esto es, el número de decibelios, las frecuencias bajas decrecen en unidades fisiológicas o phons mucho más que las medias, llegando a hacerse extraordinariamente débiles; así, un pasaje musical que ordinariamente se reproduzca a 50 dB representa para los 1000 c/s un nivel auditivo de 50 phons, mientras que a 240 c/s sólo representa 40 phons. Si ahora la reproduc-

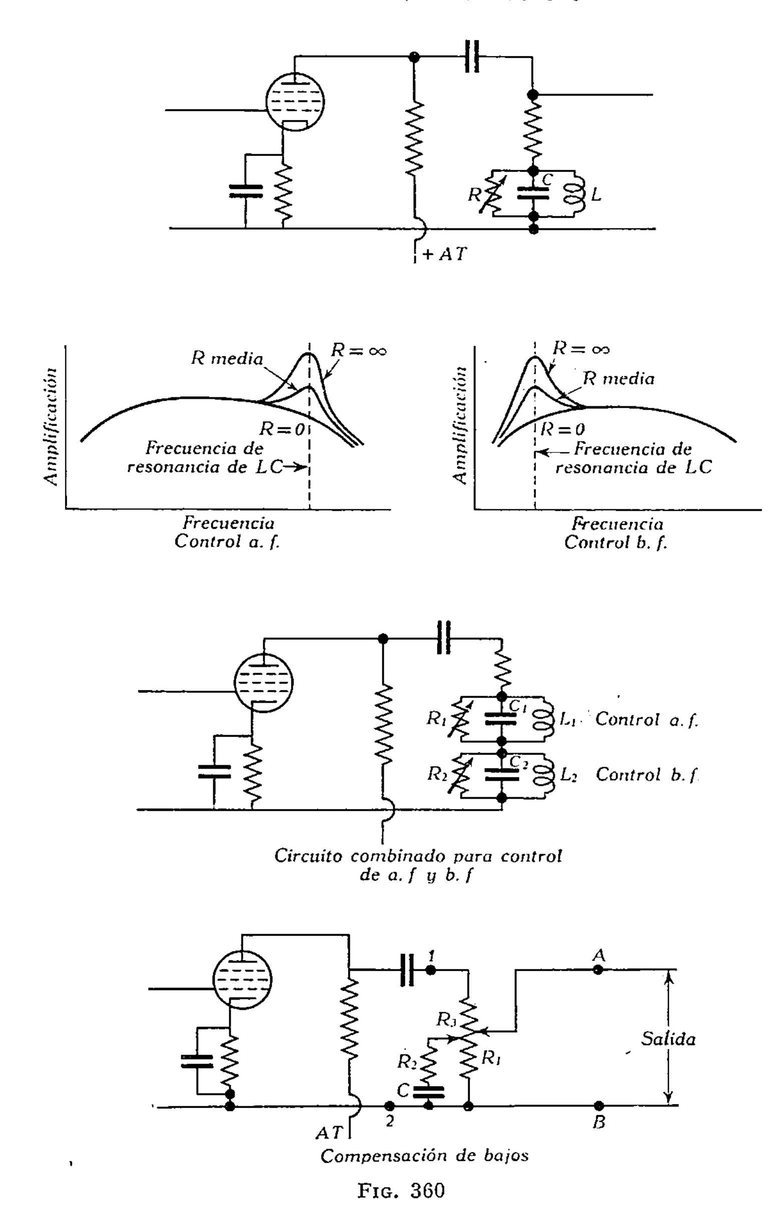


Fig. 360

ción desciende a 30 dB, es decir, se reduce en 10 dB a los 1000 c/s, nos encontramos con que a 240 c/s sólo representa 10 phons, y, por consiguiente, estamos ya muy cerca de la frontera de audición, y a frecuencias más bajas incluso puede resultar inaudible. Lo contrario sucede cuando se eleva el nivel, pues entonces las frecuencias bajas se hacen

anormalmente fuertes para el oído, como es fácil deducir de la misma figura; necesitamos, pues, un sistema de compensación que reduzca la ganancia mucho menos en las bajas frecuencias que en las medias y altas.

El tipo más popular de entre los sistemas empleados con tal finalidad se encuentra representado en la figura 360 bis y en la parte in-

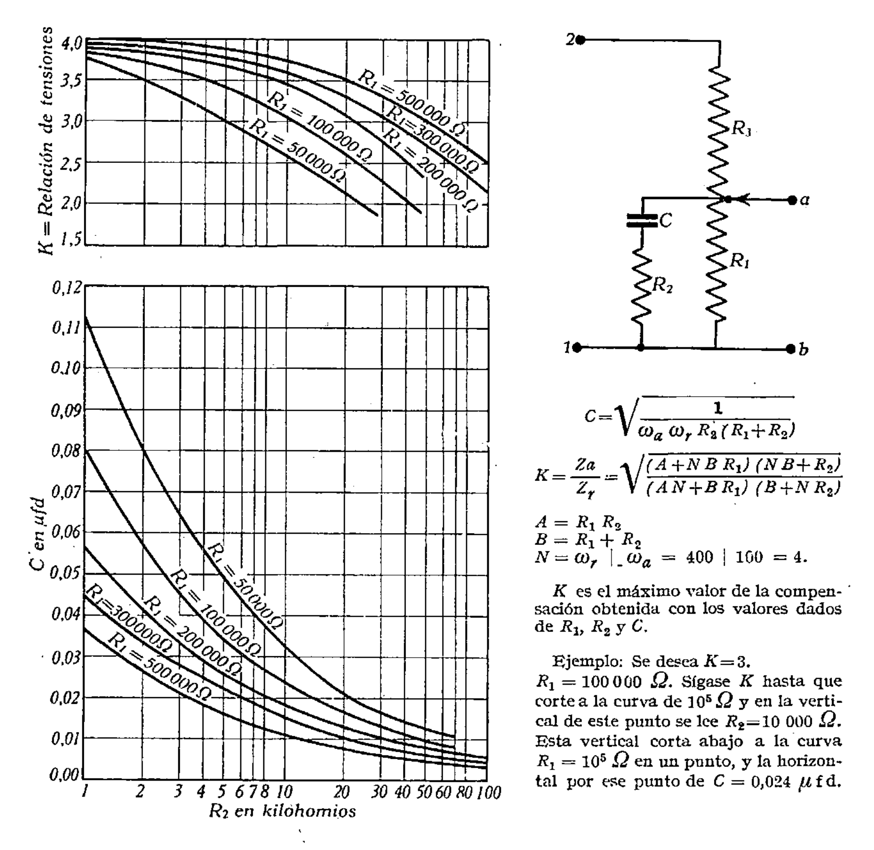


FIG. 360 bis. Diagrama para el diseño de compensación de bajas frecuencias

ferior de la figura 360; la tensión de entrada se aplica entre las bornas 1 y 2, y el resultado de la compensación se recoge entre *a* y *b*. El condensador *C* actúa como un paso fácil o corto circuito para las altas frecuencias de la señal, y el efecto para el oído es como si las bajas frecuencias hubiesen aumentado de valor. Con el fin de que las altas frecuencias no sufran pérdidas demasiado elevadas y también para fijar el nivel de salida del amplificador, cuando el brazo variable *a* se fija en la toma del condensador a que corresponde la máxima compensación, se intercala la resistencia R_2, mientras que

R_1 y R_3 constituyen el control de tono, cuya compensación se regula mediante la posición de la toma a.

El problema a resolver consiste en encontrar el valor más apropiado de C que nos dé la máxima relación de atenuación entre dos frecuencias arbitrariamente elegidas; la experiencia ha demostrado que 100 y 400 c/s son las más apropiadas a los efectos de una buena audición musical.

Considerando en la figura 360 bis R_3 abierto, la impedancia entre los puntos a y b a dos frecuencias diferentes alcanza una relación máxima para una cierta combinación de los valores de R_1, R_2 y C. Si los terminales a y b se alimentan a través de 1 y 2 desde un generador de alta impedancia, representada en este caso por R_3, la relación de tensiones entre a y b para aquellas dos frecuencias tendrá el mismo valor que la relación de impedancias para esas dos frecuencias: $f_a = 100$ y $f_r = 400$ c/s. La impedancia entre a y b, para la frecuencia f_a, vale

$$Z_a = \frac{R_1 \left(R_2 + \frac{1}{j\,\omega_a\,C}\right)}{R_1 + R_2 + \frac{1}{j\,\omega_a\,C}}$$

y para la f_r vale

$$Z_r = \frac{R_1 \left(R_2 + \frac{1}{j\,\omega_2\,C}\right)}{R_1 + R_2 + \frac{1}{j\,\omega_2\,C}}$$

el valor de C para que Z_a/Z_r sea máximo, se puede demostrar que viene dado por (¹):

$$C = \frac{1}{\sqrt{\omega_r\,\omega_a\,R_2\,(R_1 + R_2)}}$$

y llevando este valor de C a los de las anteriores impedancias, se obtiene para éstas:

$$Z_a = \sqrt{\frac{A\,(A + R_1\,BN)}{B\,(B + NR_2)}} \qquad Z_r = \sqrt{\frac{A\,(AN + BR_1)}{B\,(BN + R_2)}}$$

y por tanto, la relación de tensiones, para esas dos frecuencias, valdrá:

$$K = \frac{E_a}{E_r} = \frac{Z_a}{Z_r} = \sqrt{\frac{(A + BNR_1)\,(BN + R_2)}{(AN + R_1\,B)\,(B + NR_2)}}$$

en la que se ha puesto:

$$A = R_1\,R_2\ ;\ B = R_1 + R_2 \text{ y } N = \omega_r/\omega_a = \frac{400}{100} = 4.$$

(¹) Basta anular su derivada, respecto a C.

Sobre papel semilogarítmico se han representado, en forma conveniente para el cálculo en la figura 360 bis, los valores de las magnitudes que intervienen en esa expresión, y en la misma figura se indica la manera de llevar la determinación de las mismas para esas dos frecuencias.

Realimentación negativa (¹). En repetidas ocasiones a lo largo de esta obra hemos hecho mención de la realimentación negativa, como un recurso para lograr reducir una serie de efectos perjudiciales en conexión con los elementos asociados al amplificador y aún, como ahora vamos a ver, para modificar en medida adecuada la estabilidad y respuesta del mismo y atenuar algunas de las causas de deformación; nos toca, pues, aquí, dar una idea somera de la misma.

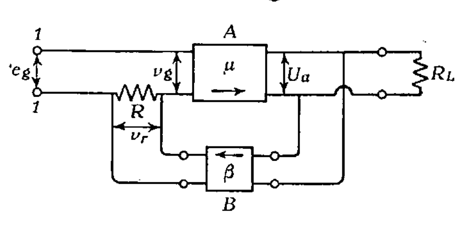


FIG. 361

Con el fin de que ésta tome la forma más sencilla posible, vamos a considerar el circuito de la figura 361 en el que se supone la condición ideal de que el amplificador A tiene una impedancia de entrada infinita o al menos tan alta que puede considerarse como tal en comparación con el resto del circuito; supongamos, además, que la salida del amplificador no es exactamente una *copia ampliada* de la entrada, ya que existe una cierta deformación global de los diferentes tipos estudiados en otro lugar, y llamemos v_g la tensión de entrada en el amplificador, μ a la amplificación en voltios del amplificador (relación vectorial entre la tensión de entrada v_g y la tensión de salida U_a). Si llamamos D al término de deformación a la salida es evidente que U_a valdría, sin realimentación, o sea, para el amplificador conectado a la manera ordinaria, $\mu v_g + D$. Supongamos ahora que una parte de la tensión de salida, la fracción β, se inyecta a través de la malla B a la entrada del amplificador y en serie con ella, mediante la resistencia R, con lo que la tensión de realimentación inyectada valdrá $v_r = \beta(\mu v_g + D)$; para que la tensión de entrada en el amplificador valga, como hemos supuesto, v_g, la tensión e_g aplicada en las bornas 1, o tensión de excitación propiamente dicha, valdrá $e_g = \widehat{v_g - v_r}$; suponiendo, como es el caso usual en la realimentación positiva o reacción, que e_g y v_r están en oposición de fase cuando el ángulo de fase entre e_g y U_a es 180°, se tendrá

$$e_g = v_g - \beta\,(\mu\, v_g + D)$$

(¹) Un estudio a fondo de este tema encontrará el lector en nuestro trabajo *Realimentación negativa y características compuestas*, publicado en «Euclides», 1947, de donde se han entresacado estas notas. Digamos de paso que es éste uno de los recursos más modernos puestos en juego actualmente en casi todos los dominios de audio y radiofrecuencia.

de donde

$$v_g = \frac{e_g + \beta D}{1 - \mu \beta}$$

y para valor de la tensión de salida $U_a = \mu\, v_g + D$, se tiene

$$U_a = \frac{\mu\, e_g}{1 - \mu \beta} + \frac{D}{1 - \mu \beta}$$

Obsérvese que $\mu \beta$ es la amplificación de tensión a través de la malla y del amplificador, por lo que se llama generalmente *amplificación del «bucle»* o también ganancia del mismo cuando se expresa en decibelios.

La tensión de realimentación propiamente dicha v_r viene determinada en función de la tensión de excitación e_g, por la expresión

$$v_r = \frac{\mu \beta e_g}{1 - \mu \beta} + \frac{\beta D}{1 - \mu \beta}$$

la cual, según sea el significado de μ, puede ser proporcional a la corriente de salida, a la tensión de salida o a ambas a la vez, es decir:

$$v_r = \beta I_a \quad ; \quad v_r = \beta U_a \quad ; \quad \text{o bien} \quad v_r = \beta_1 I_a + \beta_2 U_a;$$

en el primer caso se tiene realimentación *serie;* en el segundo, que es el caso de la figura 361, realimentación *en paralelo,* y en el tercero, *en puente* o *mixta.*

La realimentación se llama negativa cuando la tensión de realimentación v_r está en oposición de fase o tiene componente en oposición de fase con la tensión de entrada e_g, es decir, cuando el término $\mu \beta$ es negativo, con lo cual, en todas las expresiones anteriores, debe cambiarse en + el signo de dicho término.

Como la amplificación en tensión, prescindiendo de los términos de deformación, vale

$$\frac{U_a}{e_g} = \frac{\mu}{1 - \mu \beta}$$

se ve inmediatamente que es una fracción $\dfrac{1}{1 - \mu \beta}$, de la que se obtendría sin realimentación, y, por tanto, cuando sea negativa, es menor.

El caso más interesante se presenta cuando $\mu \beta$ es grande comparado con la unidad, en cuyo caso U_a tiende a

$$\frac{\mu}{\mu \beta}\, e_g + \frac{D}{\mu \beta} = \frac{e_g}{\beta} + \frac{D}{\mu \beta}$$

y, por consiguiente:

a) La amplificación $U_a/e_g = \dfrac{1}{\beta}$ es independientemente del valor de μ y de sus variaciones con la frecuencia de la excitación y con el

tiempo, como las originadas por envejecimiento de válvulas, variaciones en las tensiones de alimentación, etc.

b) Quedan grandemente reducidos, en la relación $\frac{1}{\mu \beta}$, los productos de deformación, tales como deformación por armónicos e intermodulación debidos a la falta de linearidad de las válvulas.

c) También quedan reducidos los ruidos tales como los originados en los filamentos de las válvulas, zumbido del equipo de alimentación de corriente alterna por mal filtraje, cruce de otros amplificadores, etc.

d) Finalmente, hay una reducción notable en la deformación por defasaje, ya que se puede demostrar que el retraso de fase, que en el caso de no haber realimentación designaremos por Θ (ángulo de fase de U_a, en el supuesto de que B no produzca defasaje; para una válvula, 180°), se convierte ahora en

$$\Theta - \text{arc tg} \frac{\mu \beta \text{ sen } \Theta}{1 + \mu \beta \cos \Theta}$$

evidentemente menor cuando la realimentación es negativa. Es claro que este tipo de deformación tiene relativamente poco interés en el estudio de los equipos de registro, pero es muy importante en cuestiones de Televisión y Telefonía a gran distancia.

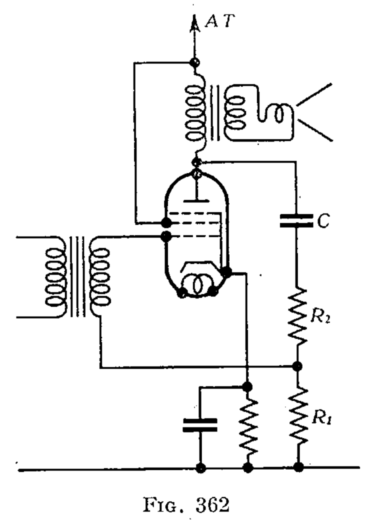


FIG. 362

Aparte de todas esas ventajas de la realimentación negativa que se deducen fácilmente de las fórmulas anteriores, como consecuencias inmediatas de su estructura, presenta otras que tienen un valor incalculable en el problema de acoplo de los diversos elementos al amplificador; entre ellas merecen citarse como más importantes un aumento en la estabilidad del mismo y una modificación ventajosa de las impedancias de entrada y salida de aquél. El primer aspecto consiste, como es sabido, en la conveniencia de impedir a todo trance que el amplificador oscile, cosa muy frecuente en los de audiofrecuencia, cuando se trabaja a volúmenes relativamente grandes y por cualquier causa existe algún acoplo parásito de la salida a la entrada, esto es, se inyecta de un modo involuntario e indeseable una tensión en la entrada, que está en fase con la de excitación y por razón del funcionamiento mismo del amplificador; la realimentación negativa reduce en gran medida tales efectos, con lo que el amplificador tiende a mantener sus condiciones de trabajo estacionarias haciéndose más estable. Nos limitaremos a dar aquí sólo esta somera indicación en cuanto a esta ventaja, pero sí vamos a ver con algún detalle el efecto de modificación de impedancias, ya que ello está relacionado más íntimamente con las observaciones que respecto a tal extremo hemos hecho varios

capítulos anteriores, y aun cuando las conclusiones son generales, nos vamos a limitar al caso de una sola válvula, con lo que llegaremos a las mismas conclusiones de un modo más sencillo y rápido.

Consideremos en primer lugar el caso de *tensión proporcional a* U_a v_r, que es el más usual, y se puede lograr, intercalando en paralelo con la impedancia de carga Z_a, una segunda formada por dos resistencias R_1 y R_2 que actúan como divisoras de tensión, de modo que $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$; tal es el caso de la figura 362, en la que C tiene como misión bloquear la tensión continua de placa.

Según vimos ya, las dos ecuaciones fundamentales de la válvula son:

$$J_a = \frac{\mu e_g}{R_i + Z_a} \qquad -U_a = J_a Z_a = \frac{\mu e_g Z_a}{R_i + Z_a}$$

de aquí que la amplificación en tensión sin realimentación para tal válvula será

$$\mu' = \frac{\mu Z_a}{R_i + Z_a}$$

Si la válvula tiene realimentación negativa, los valores de la tensión y corriente de ánodo valdrán, después de lo dicho antes:

$$U_a = \frac{\mu' e_g}{1 + \mu'\beta} = \frac{\mu Z_a e_g}{Z_a(1 + \mu\beta) + R_i} = \frac{\overline{\mu} Z_a e_g}{Z_a + \overline{R_i}}$$

$$J_a = \frac{\mu e_g}{Z_a(1 + \mu\beta) + R_i} = \frac{\overline{\mu} e_g}{Z_a + \overline{R_i}}$$

esto es, los valores que tendría para una válvula sin realimentación, pero cuyos parámetros fueran (¹):

$$\overline{R_i} = \frac{R_i}{1 + \mu\beta} \text{ y } \overline{\mu} = \frac{\mu}{1 + \mu\beta} \text{ con } S = \frac{\overline{\mu}}{\overline{R_i}} = \text{invariante.}$$

Si llamamos Z_e a la impedancia de entrada de la válvula, y nos situamos en el caso más favorable en cuanto a la deformación; esto es, que la corriente de rejilla sea cero, se ve que cuando la tensión de entrada e_g y la tensión de realimentación *están en serie*, como en el caso actual, la Z_e sigue siendo prácticamente infinita, cosa muy importante para reducir aquella deformación y consumo de energía en la excitación.

(¹) Véase, para detalles de aplicación al paso final, nuestro trabajo *Notas sobre realimentación negativa*, en la revista «Euclides», n.° 40, junio de 1944.

En cuanto a la impedancia de salida Z_s (que es la medida en las bornas del primario del transformador de salida), según se desprende de la figura, vale

$$\overline{Z}_s = \frac{\overline{R}_i (R_1 + R_2)}{\overline{R}_i + R_1 + R_2} = \frac{R_i}{1 + \dfrac{R_i + \mu R_1}{R_1 + R_2}}$$

mientras que sin realimentación,

$$Z_s = \frac{R_i}{1 + \dfrac{R_i}{R_1 + R_2}}$$

por consiguiente, entre ambas existe la relación

$$\overline{Z}_s = \frac{Z_s}{1 + \beta S Z_s} \quad \text{con } \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

es decir, *ha disminuído*, cosa muy beneficiosa, como vimos anteriormente, cuando se trata de tetrodos y pentodos de salida (Capítulo XIX, pág. 507), y natural, ya que el espacio cátodo-placa está en paralelo con el circuito de realimentación; en resumen: este modo de asociar con la válvula el circuito de realimentación presenta la ventaja de *mantener Z_e muy grande y reducir Z_s*, propiedad muy útil especialmente para atenuar las resonancias mecánicas del altavoz, según vimos al tratar de éstos. Se puede demostrar, siguiendo un proceso análogo, que la ganancia en tensión ahora vale

$$\overline{G} = \frac{\mu}{1 + \dfrac{R_i + \mu R_1}{R_1 + R_2} + \dfrac{R_i}{Z_a}}.$$

En todo lo anterior se ha supuesto que $R_1 + R_2 \gg Z_a$ a fin de consumir en ellas la menor potencia posible, que sería robada de Z_a.

Imaginemos ahora el caso de ser la *tensión de realimentación proporcional a la corriente de salida;* ello se puede lograr, por ejemplo, colocando una impedancia β (que incluso puede ser la resistencia de polarización de rejilla, sin el condensador de paso), en serie con la carga Z_a, y de los extremos de aquélla se saca la tensión $v_r = \beta J_a$.

Siguiendo el mismo camino que antes, las expresiones de la válvula sin realimentación son:

$$J_a = \frac{\mu e_g}{Z_a + R_i + \beta} \quad ; \quad U_a = \frac{\mu e_g Z_a}{Z_a + R_i + \beta}$$

con lo que la tensión y corriente con realimentación teniendo en cuenta el valor actual de $\mu' = \frac{\mu}{Z_a + R_i + \beta}$ serán:

$$U_a = \frac{\mu' Z_a e_g}{1 + \mu' \beta} = \frac{\overline{S}_m \overline{R}_i Z_a e_g}{Z_a + \overline{R}_i + \beta} \quad ; \quad J_a = \frac{\mu e_g}{Z_a + \overline{R}_i + \beta}$$

con parámetros para la válvula ficticia:

$$\overline{R}_i = R_i + \mu \beta = R_i (1 + \beta S) \quad ; \quad \overline{S}_m = \frac{S}{1 + \beta S} = \frac{\mu}{R_i + \mu \beta} \text{ y}$$

μ invariante.

Para las impedancias terminales observemos la figura 363 en la que β está en serie con Z_a, si bien al otro lado de la línea de tierra; como aquí también la tensión v_r *se aplica en serie* a la entrada de la válvula, vale todo cuanto dijimos en el caso anterior para la impedancia de entrada Z_e. En cuanto a la impedancia de salida, *aumenta*, como vamos a ver, por estar el circuito de realimentación β *en serie* con el espacio cátodo-placa de la válvula; en efecto, sin realimentación,

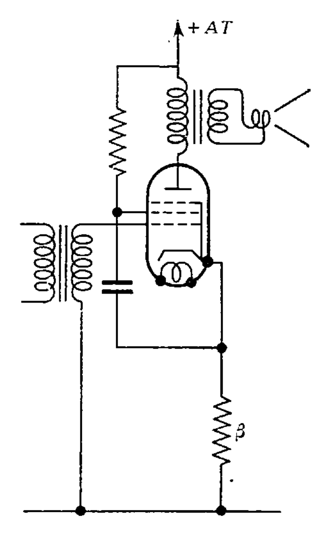


FIG. 363

$$Z_s = \beta + R_i,$$

y con realimentación,

$$\overline{Z}_s = \overline{R}_i + \beta = R_i + (\mu + 1) \beta.$$

Entre ellas existe, pues, la relación

$$\overline{Z}_s = Z_s + \mu \beta.$$

Se obtienen así resultados inversos de los de la realimentación en tensión y, naturalmente, para tetrodos y pentodos, que tienen ya una alta Z_s, se comprende que tenga poca utilidad este tipo de realimentación.

Para la obtención de la ganancia, no debe perderse de vista que la ganancia μ es ahora ganancia en corriente, y, por tanto, la ganancia en tensión se obtendrá multiplicando dicha μ por la impedancia de carga Z_a; esto es:

$$G' = \frac{\mu' Z_a}{1 + \mu' \beta} = \frac{\mu Z_a}{Z_a + \overline{R}_i + \beta} = \frac{\overline{R}_i \overline{S}_m Z_a}{Z_a + \overline{R}_i + \beta}$$

El hecho de que la realimentación-serie aumente la impedancia de salida puede inducir a pensar que este tipo no tendrá verdadera utilidad;

no obstante, vamos a citar un caso en el que tiene interés el empleo de tal forma de realimentación y que encuentra especial aplicación en las redes divisoras de frecuencias. Como es bien conocido, tales redes no son en el fondo otra cosa que filtros, los cuales precisa, para que haya la adecuada transferencia de energía, que se carguen con impedancias iguales a la suya característica. Cuando están conectadas a la salida de una válvula, como en la figura 364, entonces uno de los extremos del filtro o red lleva una impedancia de carga a la entrada igual a la R_i de la válvula, y deben cerrarse en el otro extremo también con R_i.

De este modo, el filtro trabaja correctamente, pero no así la válvula, cuya carga en sus condiciones óptimas suele ser varias veces R_i; es aquí donde tiene ventaja el empleo de tal tipo de realimentación.

La carga óptima de la válvula no se altera por el uso de tal artificio, mientras que nosotros podremos elevar la impedancia de salida de la válvula, que actúa como carga para el filtro, al valor que nos convenga. Por ejemplo, si la válvula va conectada como se ve en la figura 365, siendo su $R_i = 10\,000\ \Omega$ y su carga óptima son $20\,000\ \Omega$, el filtro deberá tener una impedancia característica de $20\,000\ \Omega$ y lo cerraremos en el otro extremo con la misma carga. Entonces la válvula trabaja sobre su carga óptima, pero el filtro está cargado a la entrada con $10\,000\ \Omega$. Empleando realimentación serie y sin más que quitar el condensador de cátodo, podremos lograr cargarle a la entrada con dicha impedancia característica; en efecto, basta que

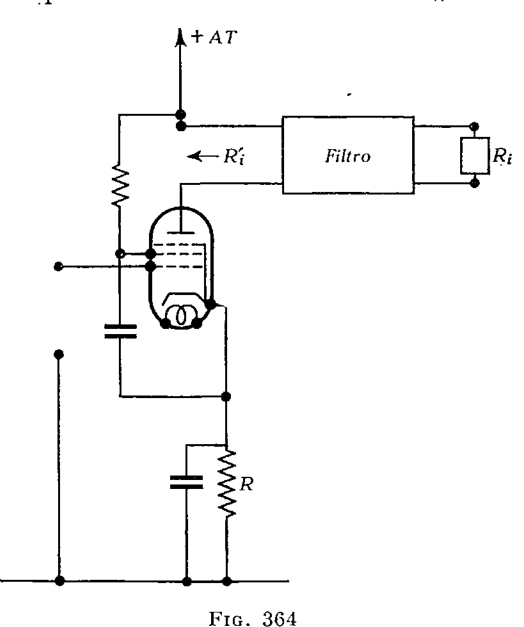


FIG. 364

$$20\,000 = 10\,000 + \beta \cdot (\mu + 1),$$

y suponiendo que $\mu = 20$, se obtiene para β el valor 447 Ω que nos permitirá lograr tal equilibrio de impedancias. Es posible que 447 Ω no sea un valor adecuado para la polarización de rejilla, pero la resistencia, en tal caso, se divide en dos en serie: una de ellas β y la otra en paralelo, con el condensador de paso, de modo que la suma de ambas complete la resistencia de polarización.

Compresión y dilatación de volumen. En el capítulo relativo a la película hemos visto que existe una serie de dificultades para registrar el sonido relativo a ciertas acciones o pasajes musicales, especialmente la que se relaciona con la latitud de volumen, cuando se quiere dar al sonido un carácter estereofónico o, como se dice también, *un relieve acústico,* esa latitud de volumen se extiende entre los 30 y los 110 dB, es decir, unos 80 dB, que, como vimos, son imposibles de registrar por los métodos conocidos usuales o corrientes; hay necesidad, pues, de reducir esa latitud de volumen a límites posibles sin deformar el sonido. En las emisiones de Radiodifusión se plantea un problema semejante de reducir el nivel de modulación a valores prefijados, si no se quiere sobremodular la portadora, y algo de ello encontrará el lector en otro lugar ([1]). En fin, si se quiere reproducir el sonido cuya latitud de volumen ha sido reducida en el registro, restituyéndole toda la que tenía en un principio, o quizá aumentándola si se quiere obtener efectos sonoros, se precisa disponer de un sistema que dilate tal latitud en el sistema reproductor sonoro; tendremos, pues, un *compresor* de volumen en el sistema de registro y un *dilatador* o expansor de volumen en el sistema de reproducción.

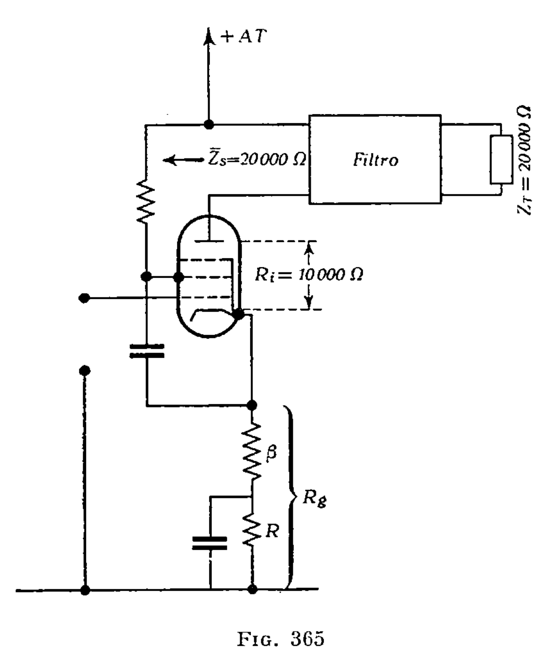


Fig. 365

El procedimiento más sencillo para mantener el volumen dentro de la zona registrable en la película, sería intercalar un atenuador variable y regulable a mano y un decibelímetro, y actuar sobre el atenuador de modo que la aguja se mantenga entre los dos límites de la latitud deseada, constantemente y aun dentro de esto, y si se quiere la mayor eficacia en el registro, moverse de modo a tener la aguja siempre lo más cerca posible del tope superior; esto, sin embargo, tiene varios inconvenientes, como vamos a ver.

Según dijimos, la latitud de volumen está determinada por dos límites: la superficie de ruidos y el nivel de sobrecarga; el ajuste manual se hace al máximo nivel compatible con la capacidad de sobre-

([1]) Gil Santiago, *La corrección automática de frecuencia,* publicado en «Metalurgia y Electricidad», n.° 64, diciembre de 1942; nota al pie.

carga del equipo. Supongamos que este valor sea —5 dB (fig. 366), y que la latitud registrable en la película sin deformación sea de 30 dB. Si los niveles a registrar abarcan una latitud de 70 dB y la característica del sistema de registro supuesto sin pérdidas es la representada por la diagonal, podremos llevar al punto *B* (más adecuado para el registro) a cualquier nivel de la gama de los 70 dB mediante el control manual; pero entonces, como sabemos que sólo caben 30 dB registra-

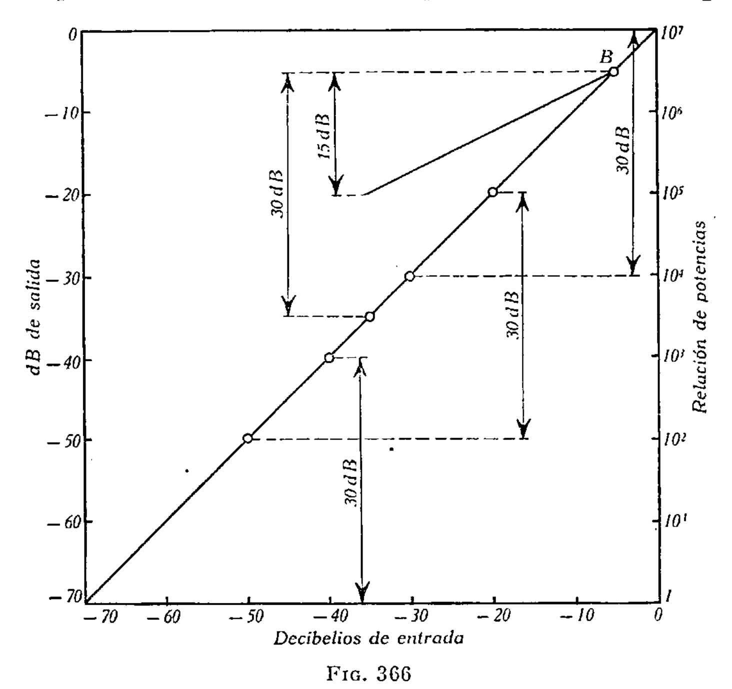


FIG. 366

bles en la película, sólo serán reproducidos los sonidos cuyo nivel sea hasta 30 dB por debajo de aquel que hemos llevado al punto *B*. Para poder abarcar todos, y en la hipótesis de que las variaciones de volumen sean suficientemente lentas para poder seguirse por el operador con el control manual, rebajaremos el sonido más intenso en —5 dB y elevaremos el más débil de la gama de los 70 dB, en 35 dB; con ello, todos los sonidos a registrar quedarán comprendidos entre los niveles —5 y —35 dB, cuya latitud de 30 dB es posible ya registrar en la película, y habremos aumentado la gama registrable en 40 dB. Claro está que todo esto es a condición de que *los sonidos más débiles sean registrados al tope mínimo en la película,* y que las variaciones de nivel sonoro sean lo suficientemente lentas para poder seguirse con el control manual. Cuando tales condiciones no se cumplen, esto es, cuando haya necesidad de registrar aquel sonido más débil a un nivel más elevado, y además las variaciones de nivel

son suficientemente rápidas, como sucede aún dentro de una misma sílaba, para que no puedan seguirse con el Fader, entonces se requiere un medio complementario que comprima esa latitud de 30 dB a otro valor menor, a fin de que las crestas de los sonidos no sobrecarguen el sistema, y además esto debe hacerse de un modo automático. Un sistema que cumple con tales condiciones se llama un *compresor de volumen*, y para ello se requiere que su pendiente sea inferior a la del sistema anterior, es decir, debe introducir pérdidas de transmisión, tanto más fuertes cuando mayor sea el nivel a transmitir.

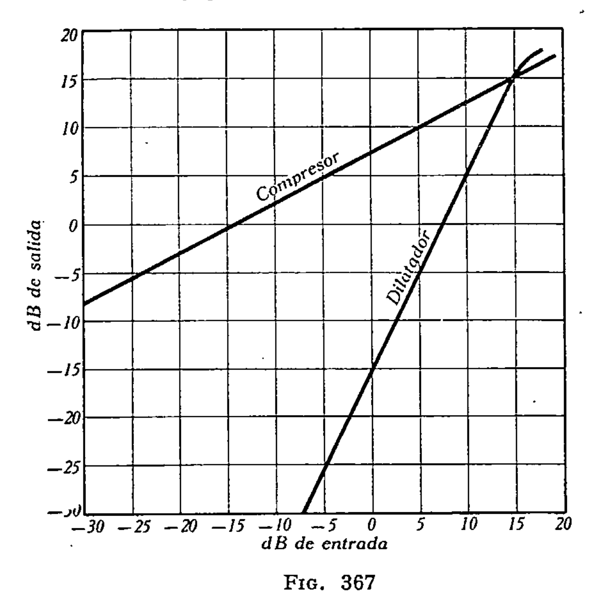


Fig. 367

Naturalmente, en el equipo reproductor de un sonido registrado con tal sistema se deben efectuar las dos operaciones inversas de las anteriores, esto es, una expansión o dilatación, lenta, por así decir, que efectúa el operador mediante el manejo del Fader, y una dilatación rápida mediante un sistema que dilate la latitud automáticamente y en sentido inverso a como lo hace el compresor; evidentemente, un tal sistema debe introducir ganancias de transmisión tanto mayores cuanto mayor sea el nivel, y, por consiguiente, debe tener una pendiente simétrica de la del compresor, pero mayor que la de la diagonal, con respecto a esta diagonal; tal sistema constituye un *expansor* o *dilatador de volumen*. Se comprende fácilmente que a menos que se busquen efectos musicales, el uso del dilatador sólo está justificado cuando el registro se ha hecho con compresor.

En la figura 367 se muestra el efecto y características de ambos sistemas, cuando la relación de compresión de volumen es 1/2 y la dilatación es 2; el compresor actúa linealmente en una zona de 45 dB de entrada, mientras que el dilatador lo hace en una de 22,5 dB; como tales latitudes son menores que la más extensa de 70 dB que realmente se debe manejar, es más conveniente controlar el volumen a la entrada, en esta clase de circuitos, que comprimir o dilatar primero y después controlarlo. Dejando para otro lugar en que nos ocuparemos del Registro de Sonido, el estudio del circuito del compresor, vamos a ocuparnos a continuación del

Expansor o dilatador de volumen. Un circuito típico se encuentra en la figura 368, donde las resistencias r son pequeñas, comparadas con las de las dos válvulas; en tales condiciones, se puede escribir:

$$E_8 = k\,E_7{}^n$$

en la que n es el índice de expansión y K es una constante (¹):

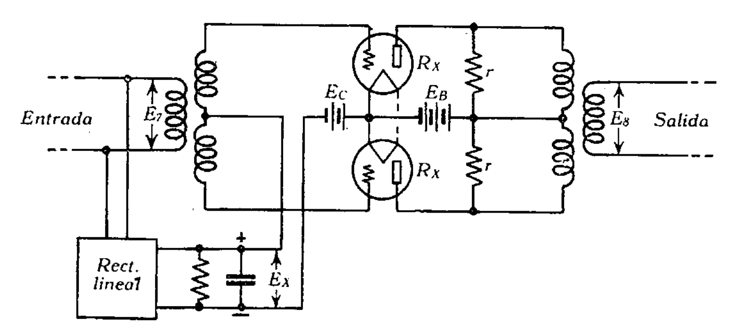


Fig. 368. Diagrama de expansor de volumen

Imaginemos ahora que la tensión E_7 aumenta en el factor x, convirtiéndose en E_7', con lo que el nivel relativo en decibelios será:

$$E'_7 = x \cdot E_7 \qquad N_{dB} = 20 \log \frac{E'_7}{E_7} = 20 \log x$$

y el valor correlativo de esa tensión para la de salida, que llamaremos E_8', llamando N'_{dB} al nivel relativo de salida será:

$$E_8' = k\,(x\,E_7)^n = k\,E_7{}^n \cdot x^n = x\;\;E_8\;;\;N'_{dB} = 20 \log \frac{E_8'}{E_8} = n \cdot 20 \log x,$$

por tanto,

$$\boxed{N_{dB}' = n\,N_{dB}}$$

se ve, pues, que ha habido efectivamente una dilatación de nivel de valor n; esto explica por qué se llama a n índice de expansión o dilatación.

Esta última relación es precisamente la inversa de la que obtendremos en el estudio del compresor en nuestro curso de *Registro*, y se ve claramente que un compresor y dilatador del mismo índice n, coloca-

(¹) El establecimiento de esta fórmula supone que la tensión de placa está justamente neutralizada por la tensión de polarización de rejilla, con lo que la corriente espacial de placa es sólo función de la tensión variable de excitación de rejilla y se puede suponer idealmente proporcional a una potencia de esa tensión.

dos en tándem, dan niveles de salida idénticos a los de entrada. Cuando $n = 2$, la relación de tensiones a la entrada es proporcional a la raíz cuadrada de la relación a la salida, ya que entonces:

$$2 \cdot 20 \log \frac{E'_7}{E_7} = 20 \log \frac{E_8'}{E_8} \quad ; \quad \frac{E_7'}{E_7} = \sqrt{\frac{E_8'}{E_8}}$$

Las condiciones ideales postuladas para el establecimiento de las expresiones finales del dilatador y compresor distan un poco de ser

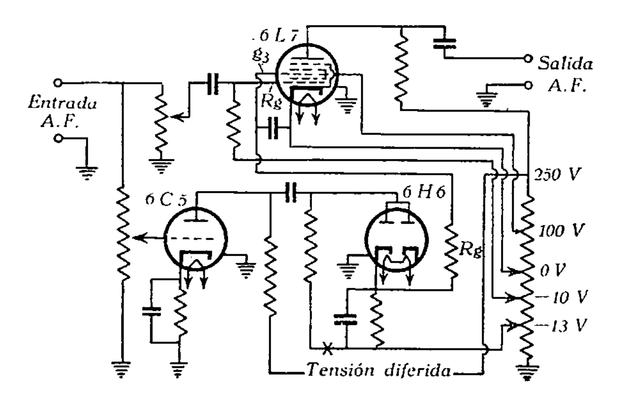


FIG. 369. Expansor de volumen para uso con reproductor en disco

exactas en la práctica; en primer lugar, los índices n de ambos que dependen de las características dinámicas de las válvulas y circuito asociado, no pueden mantenerse constantes más que sobre una zona limitada de funcionamiento. Por otra parte, la hipótesis formulada anteriormente en la nota al pie, es cierta sólo de un modo aproximado, puesto que alguna corriente espacial fluye cuando pasa la señal, ya que de otra manera se requirirían valores prácticamente infinitos para las impedancias de control; no obstante, son suficientemente aproximadas a las condiciones comerciales de la práctica.

Los valores particulares que hemos señalado para la compresión y dilatación se eligieron inicialmente teniendo en cuenta la mayor facilidad en el diseño del sistema con las válvulas comerciales existentes en el año 1934, cuyas características son, aproximadamente, del tipo de parábola, pero es evidente que ese grado de compresión y expansión puede controlarse con diferentes medios; tales son, por ejemplo, el empleo de índices de expansión y compresión distintos, el uso de tensiones de mando sobre más de un paso, o con el empleo de válvulas de μ variable, y, finalmente, mediante el empleo de válvulas con varias rejillas cuya amplificación puede variarse actuando sobre rejilla distinta de aquella sobre la que actúa la señal según el nivel de ésta. Tal es el caso más corrientemente empleado en la actualidad

y representado esquemáticamente en la figura 369, con la válvula 6L7 cuya ganancia puede modificarse mediante la polarización variable de la rejilla n.° 3. Cuando su polarización se hace menos negativa, la ganancia de la válvula aumenta. En el circuito, la señal que se debe amplificar se aplica a la rejilla n.° 1 de esta válvula y también a la de la válvula 6C5, la cual amplificada por ésta se aplica a la rectificadora 6H6. La tensión rectificada desarrollada a través de la R_g, resistencia de carga de la 6H6, se aplica como tensión positiva de polarización a la rejilla n.° 3 de la 6L7. De este modo, cuando el nivel de la señal de entrada aumenta, crece la caída de voltaje en R_g, y la polarización de la rejilla n.° 3 de la 6L7 se hace menos negativa, con lo que aumenta la ganancia de la 6L7 al mismo tiempo que el nivel de la señal de entrada, originando la dilatación de volumen. La rejilla n.° 1 de la 6L7 origina una característica de μ variable por la construcción misma de la válvula a los efectos antes citados. En nuestro *Curso de Cine Sonoro (Registro)* daremos más detalles de diseño sobre Compresores y Dilatadores.

XXI. La acústica de la sala

Importancia del aspecto acústico de un local; coherencia. La parte más difícil de la reproducción del sonido en recintos cerrados lo constituye el estudio de la calidad y distribución del sonido en una sala, probablemente por no ser nada fácil plantear, con un número reducido de datos, las relaciones cuantitativas que liguen aquellas cualidades con un número limitado de magnitudes que podamos manejar a voluntad. En general, no es suficiente equipar un local determinado con un buen sistema reproductor de sonido para poder asegurar que la audición es perfecta o agradable e inteligible en todos los puntos de la sala; en el caso especial de salas de cine, el problema viene complicado, además, con respecto al de un teatro o una sala de conferencias por una característica que es propia o inherente a él y verdaderamente difícil de definir con precisión, de la cual ya hemos hablado en otra ocasión: es lo que los ingleses llaman *intimacy*, o *coherencia entre el sonido y la «acción»* que se está desarrollando en la pantalla y que, podríamos decir, es la necesidad de que el foco de sonido se desplace en apariencia para el espectador, en perfecto acuerdo con los desplazamientos de los actores o elementos productores de sonidos en la pantalla, dando esa sensación de relieve o estereofonicidad, tan indispensable para que la proyección dé la ilusión de una escena real.

Cuando tal coherencia no es perfecta, el oído percibe claramente la falta de identidad entre el foco de sonido y la acción que se efectúa en la imagen sobre la pantalla; la crítica sobre la causa de la falta de realidad es incierta e imprecisa, pero tiene la certeza y evidencia de que la reproducción de la escena no es satisfactoria. Cuando se desea que el sonido en relieve o estereofónico tenga una aplicación práctica real, se necesita que el espectador perciba claramente como el foco de sonido se desplaza en consonancia con los movimientos que en la pantalla se realizan.

Los resultados positivos hasta hoy obtenidos sólo son debidos, cuando no a mera casualidad, a los esfuerzos coordinados del arquitecto, del ingeniero o técnico especializado en estas cuestiones acústicas, y del fabricante o proyectista del equipo de reproducción. En general, para obtener la mejor calidad posible de sonido en el oído

de todos y cada uno de los espectadores, es necesario que el equipo reúna ciertas condiciones de flexibilidad y adaptabilidad a cotas límites, entre las cuales puedan variar las características de las distintas salas, debiendo en cada caso particular o bien ajustar la sala a las condiciones del equipo, o, lo que es más fácil y práctico, ajustar el equipo de reproducción a las características especiales de la sala. Si las características acústicas de la sala quedan dentro de ciertos límites, entre los cuales se ha diseñado la elasticidad del equipo, el ajuste de éste es posible y relativamente fácil en la gran mayoría de los casos; pero cuando tales características acústicas están más allá de aquellos límites, no hay equipo, por perfecto y flexible que sea, que permita una audición lograda en todos los asientos de la sala, y entonces lo único aconsejable y prudente es modificar tales características de la sala mediante un tratamiento acústico adecuado de la misma, si es que con ello es probable la posibilidad de una corrección eficaz.

En la gran mayoría de los casos, al menos en nuestro país, es fácil relativamente encontrar un equipo de reproducción sonora que satisfaga la mayoría de los requisitos hasta ahora estudiados en la presente obra, y esas condiciones de elasticidad de que hemos hablado, pero no lo es tanto, unas veces por ignorancia y otras veces por razones de una economía mal entendida, encontrar arquitectos y empresarios dispuestos a sacrificar o amoldar algunas de las cualidades artísticas o decorativas de la sala a las más fundamentales de la acústica de la misma, lo que da lugar al caso frecuente de cinemas que, aun teniendo un equipo de reproducción de calidad, tiene pésimas condiciones de audición, o zonas muertas donde la inteligibilidad de la conversación se hace nula [1].

El estudio de las características acústicas de una sala para cinema no es, pues, nada fácil, y en general no se pueden dar reglas rígidas; pero existe hoy día una serie de normas y métodos de medida que permiten desechar como inadecuadas ciertas formas y tipos de salas, y también saber en qué medida determinados factores pueden mejorar las condiciones de acústica de una sala ya construída, pero de resultados poco satisfactorios.

En la práctica, el estudio de la acústica de la sala se plantea bajo dos aspectos distintos, según se trate de modernizar una sala ya exis-

---

[1] Este caso se le ha presentado al autor en algunos locales a su cuidado, dándose el hecho curioso de que las pocas casas españolas que se dedican a decorar locales con materiales acústicos absorbentes, no permiten la instalación de los mismos más que bajo su dirección, y en la gran mayoría de los casos carecen de conocimientos suficientes para que su aplicación sea beneficiosa y adecuada al fin que se persigue. Por otra parte, sería muy conveniente que los empresarios, cuando por fin se decidan a modificar las características de su local, lo hagan aconsejándose de técnicos o empresas capaces; ello les ahorraría en muchos casos parte de su dinero gastado en tales modificaciones, y mejorarían sus ingresos por haber logrado en la mayoría de los casos algo más que un simple cambio de motivos decorativos, que en algunas ocasiones puede llegar hasta ser perjudicial a los fines que se persiguen.

tente o de una nueva construcción, y tanto en uno como en otro caso este aspecto acústico *debe tomar una importancia predominante y fundamental sobre todos los demás que pudieran presentarse.* No debe perderse de vista que el resultado de una verdadera modernización reside en un compromiso entre las cualidades artísticas o decorativas proyectadas y las normas acústicas que gobiernan el sonido y su distribución sobre el área de audición, y que siendo la masa de aire confinada en la sala un eslabón más de la cadena o sistema de transmisión, intercalada entre el sistema de altavoces y el oído del espectador, la calidad del sonido para cada espectador, esto es para cada punto de la sala, depende de las condiciones de transmisión de esa masa de aire, y éstas, a su vez, vienen influenciadas por las condiciones de las paredes, techo y suelo (además de los elementos difusores y absorbentes que forman los asientos y espectadores), es decir, empleando un lenguaje académico, por las *condiciones en los límites o condiciones de contorno.* Se comprende, pues, el interés de tales condiciones de contorno y su repercusión en las condiciones de transmisión de tal masa de aire.

En el segundo caso, o sea, la construcción de una sala nueva, el problema se concreta en encontrar formas y dimensiones adecuadas de la misma para un determinado número de espectadores, con la mejor audición posible y con el mínimo tratamiento acústico de las superficies de contorno. En el primer caso de la modernización se trata de determinar en qué medida deben alterarse determinados factores que afectan a esas condiciones en los límites (incluyendo los asientos como elemento difusor y absorbente) para mejorar la audición, pero sin modificar fundamentalmente las dimensiones y *forma* de la sala.

Estudio de la masa de aire confinada. En general, las condiciones de contorno intervienen en las características de transmisión de dicha masa por el efecto de tres fenómenos fundamentales: *a)* interferencia, eco y focos o zonas de acumulación de sonido; *b)* resonancia; *c)* período transitorio o reverberación.

a) El fenómeno de las interferencias es familiar desde el estudio de la física elemental; en los locales de cine se produce a causa de las reflexiones sobre las superficies de contorno y puede dar lugar a posiciones locales del auditorio en las que el sonido adquiera una intensidad más alta o baja que la ordinaria en el resto de la sala. Como ya hemos indicado, el sonido se propaga en forma de ondas, y puede existir alguna posición del cinema en la que se reciba, en el mismo instante, una cresta o máximo de la onda de sonido directo del altavoz, y una cresta de una onda reflejada sobre una o varias de las paredes límites de la sala, o las de varias ondas reflejadas; la coincidencia de estas crestas en un mismo instante y punto del local da lugar a un incremento notable de la intensidad del sonido en ese punto. Por el contrario, pueden existir sitios en los que coincidan una cresta o máximo de la onda directa con un valle o mínimo de las ondas reflejadas, y en

tales puntos se obtienen decrecimientos en la intensidad del sonido. Un ejemplo típico de esta clase de fenómeno es fácil de lograr en locales en que por su anchura se utilicen dos altavoces idénticos y en fase de tal modo orientados que el cono de sonido de uno de ellos recubra en parte el del otro. Entonces (fig. 370), representando las ondas por sus secciones circulares, se encuentran puntos como los marcados con *o* en los que coinciden los máximos y, por tanto, para las butacas colocadas en esos puntos hay un máximo de sonido; por el contrario, en los puntos marcados con x, en los que coincide una cresta de la onda de un altavoz, con un valle de la onda del otro, el espectador colocado en butacas situadas en tales posiciones, no percibe apenas el sonido. Este caso extremo puede presentarse en una cierta medida con el sonido directo y el reflejado sobre una pared, de muy poco poder absorbente, y nos ilustra además sobre la conveniencia de, en tales sistemas reproductores, orientar los altavoces de modo que sus conos de sonido no se cubran parcialmente, pues en la zona común se presentará este fenómeno. Si llamamos S la diferencia de marcha entre ambos trenes de ondas, la condición de coincidencia de dos crestas viene dada por:

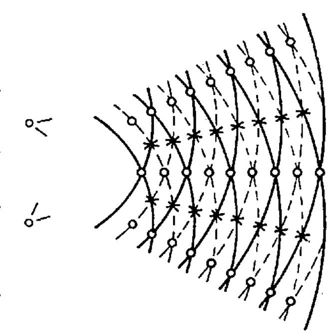


Fig. 370. Interferencia de dos focos sonoros

$$\delta = n\lambda; \qquad \text{con } n = \text{número entero}$$

mientras la coincidencia de una cresta de uno con un valle del otro dará

$$\delta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

y tanto en una como en otra se ve que es función de la longitud de onda λ del sonido, o lo que es lo mismo de la frecuencia f. A cada longitud de onda corresponde, pues, una distancia fija, como diferencia de marcha, para que se produzca este fenómeno, y siendo en general muy complejo el sonido emitido por un altavoz, se comprende que sólo para determinadas frecuencias se produzca tal fenómeno; el cual origina como consecuencia una verdadera deformación de amplitud, para el sonido complejo original, en los distintos puntos de la sala en que pueda producirse este fenómeno. Si bien es verdad que no se manifiesta con demasiada frecuencia en las salas de cine, se observa especialmente en las notas sostenidas. Algo semejante podría decirse de las ondas estacionarias cuando la reflexión es sensiblemente normal, y se presenta con frecuencia cuando la pared posterior del local es plana y sumamente reflectora.

Un efecto perturbador mucho más acusado y frecuente se produce en los cinemas por causa del *eco*. Este fenómeno tiene su origen en la inercia del oído humano, en el que una impresión sonora no desaparece instantáneamente, sino que persiste un tiempo sensiblemente igual a 1/15 segundos, igual aproximadamente al de persistencia de las imágenes en la retina, y con la cual presenta gran analogía. Si un espectador situado en un punto de la sala percibe un sonido directo de los altavoces, y este mismo sonido después de reflejarse en una o varias paredes de la sala, llega al oído del citado espectador con suficiente intensidad, y al cabo de un intervalo de tiempo contado a partir del momento en que percibió el sonido directo, inferior a 1/15 de segundo, dicho espectador no percibirá eco alguno; pero si el tiempo empleado en la propagación del sonido reflejado, desde el momento de percibir el sonido directo hasta que llega al oído de dicho espectador, excede de 1/15 de segundo, entonces el sonido reflejado alcanza el oído cuando ya ha desaparecido la sensación del sonido directo y el espectador percibe con un cierto retraso una repetición del sonido inicial que no es otra cosa que el eco. De aquí se deduce que se podrá determinar cuál es la mínima distancia que debe recorrer el sonido reflejado, para que haya eco, en el tiempo transcurrido mínimo de 1/15 de segundo que permite al oído percibir dos sonidos como diferentes. En efecto, puesto que el sonido se propaga a razón de 340 m por segundo, deberá tenerse:

$$340 \cdot 1/15 = 22{,}66 \text{ m}$$

Una persona que hable delante de una pared suficientemente reflectora para que alcance con bastante intensidad el sonido reflejado para ser percibido por el oído, y cuya pared se encuentre a más de 11,33 m de distancia (recorrido de ida y vuelta igual a 22,66 m), escuchará el eco de sus propias palabras tanto más distintamente cuanto más reflectora sea la pared y más distante se encuentre a partir de esa distancia mínima; si se encuentra a menor distancia, no habrá, pues, eco.

En el caso de salas de cine, toda pared de superficie plana y bien pulimentada, como es el caso de las de yeso, cemento o estucadas y recubiertas con baldosas, constituye un excelente reflector especular (es decir, reflector regular o de rayos reflejados dirigidos según un solo haz), y, por consiguiente, es capaz de originar ecos. Es, pues, de importancia capital romper todas las superficies límites o de contorno de una sala, para producir superficies de distribución irregular que impidan la producción de ecos difundiendo el sonido en direcciones variadas. El principal origen de ecos en los cinemas lo constituye la pared posterior u opuesta a la pantalla cuando ésta es plana; la reflexión sobre ella da lugar a una falta de inteligibilidad en las primeras filas de butacas de la sala, motivada por el eco producido en dicha pared, para esas filas de butacas.

Es fácil, en principio, darse cuenta de esa falta de inteligibilidad, motivada por el eco, si se tiene en cuenta que en el oído se superponen a las sílabas directas de los altavoces, las sílabas de la misma palabra que alcanzan el órgano del oído con un cierto retraso, esto es, alguna sílaba anterior de la misma palabra, y la cosa es aún más acentuada cuando se producen ecos múltiples en razón de varias reflexiones sobre otras tantas paredes.

Un tipo especial de perturbación motivada por el eco, probablemente el más perjudicial en las salas de cine, es el que, en alguna parte de la sala, origina zonas o focos de sonido donde van a reunirse los rayos reflejados procedentes de alguna región curvada del techo o las paredes laterales. Las salas con techo en forma de cúpulas esféricas, parabólicas de rotación o formas similares, pueden dar lugar a esta forma de eco, si el radio de curvatura de la superficie es suficientemente pequeño para que converjan las ondas de sonido reflejado en algún lugar dentro de la sala.

Estos focos de sonido producidos por la reflexión regular de superficies curvadas, pueden originarse aun cuando la diferencia de camino de las ondas reflejadas no sea suficiente para producir ecos con respecto al sonido directo, pero sí suficientes para que localmente en alguna región se produzca un incremento de sonido. Se requiere mucha experiencia y cuidado para localizar las superficies que originan tales focos de sonido, ya que la marcha de los rayos sonoros reflejados no puede seguirse tan fácilmente como para los rayos de luz.

Dentro de este grupo de fenómenos cabe incluir también el que se conoce con el nombre de *reverberación del escenario*, por sus características semejantes a las que estudiaremos en el apartado *c)*, aun cuando su origen sea debido más bien a la formación de ondas estacionarias. Como hemos visto al hacer el estudio de las bocinas y altavoces, éstos son direccionales, y si fuera posible dirigir toda la energía sonora a la sala, las propiedades acústicas del escenario no jugarían ningún papel; desgraciadamente, estas condiciones ideales no se realizan en la práctica debido a que las bocinas no son totalmente impermeables al sonido, ni, como hemos visto, poseen propiedades direccionales en las bajas frecuencias; un apreciable porcentaje de la energía sonora se refleja en la pantalla y es devuelta al escenario, y, por último, los altavoces de cono radian hacia su parte posterior casi con tanta eficacia como hacia delante, lo que origina en el escenario un nivel de bajas frecuencias casi tan elevado como el que se emite a la sala. Esta observación es especialmente aplicable a los sistemas de tres canales (50-300, 300-3000, 3000-8000), y se comprende por ello que las condiciones reflectoras del contorno del escenario deban ser cuidadosamente analizadas.

El tipo más corriente de perturbación originado por esta causa es la reflexión repetida entre la pared posterior del escenario y *baffles*, o entre techo y suelo, o entre las dos paredes laterales, y las frecuencias a que dan ocasión son aquellas para las que las ondas reflejadas

vuelven a la boca de la bocina, o la parte posterior de los altavoces de cono, en fase con el sonido que en ese momento sale del altavoz; en tal caso, la intensidad del sonido reflejado aumenta, y después de varias reflexiones se crea un sistema de ondas estacionarias en la parte posterior del escenario.

Si en un cierto instante el sonido de tal frecuencia se anula o cambia aquélla, esas ondas estacionarias no desaparecen inmediatamente, sino que tardan un cierto tiempo en amortiguarse, y se produce un *enganche (acrochage, hang-over)*, efecto muy semejante al de reverberación que se produce en la sala y que estudiaremos a continuación. Este efecto es más perjudicial, porque proviene de la misma dirección en que radian los altavoces. y el espectador no puede hacer uso de su audición biaurial para separar el sonido directo del sostenido por este efecto transitorio, y la conversación pierde claridad e inteligibilidad. Se comprende por ello que los materiales absorbentes empleados en el escenario deben tener una característica de absorción con la frecuencia especialmente elevada para esas frecuencias críticas.

b) Resonancia. Aunque afortunadamente este fenómeno es poco frecuente en las salas de cinemas, vale la pena de tener en cuenta su influencia. Todo sistema elástico es capaz de entrar en vibración con una determinada frecuencia propia o normal, por la acción de una fuerza de la misma frecuencia, la cual depende de las constantes características del sistema vibrante: tal es el caso de la masa de aire confinado en la sala y las paredes de la misma, sistema capaz, por tanto, de entrar en resonancia. El efecto de vibración del aire confinado se reduce a una sola frecuencia, y el resultado será un aumento de intensidad en el sonido que posea dicha frecuencia. Generalmente, el sonido fundamental de vibración de la masa de aire es en las salas de cines, de suficientemente baja frecuencia, para que caiga fuera de la gama de frecuencias a reproducir, y, por tanto, su efecto perjudicial no tiene influencia; pero es posible que existan en la sala pequeñas cavidades, como palcos, huecos semicerrados, etc., que, actuando como resonadores, tengan frecuencias de resonancia propias dentro de aquella gama, cuyos efectos perjudiciales pueden producir una gran perturbación en la reproducción del sonido. Un caso muy frecuente de este tipo de deformación procede de la resonancia mecánica de delgados paneles de madera u otra substancia, utilizados como motivos decorativos en el esquema del teatro o cinema. Para ellos, si su frecuencia propia cae dentro de aquella gama de sonidos a reproducir, se producirá esa vibración de resonancia, originándose una deformación del sonido motivada por una pronunciada intensidad de la nota correspondiente a esa frecuencia.

c) Reverberación. Este factor es el más característico de los que intervienen en la acústica de locales cerrados, y físicamente representa una persistencia del sonido producido por un foco sonoro en la sala, después de haber cesado la actividad de dicho foco. Se trata, pues, de un fenómeno impulsivo o transitorio que, en la práctica, se mide por lo

que se llama *período de reverberación* o tiempo empleado por un sonido de intensidad standard prefijada en atenuarse hasta hacerse inaudible, después de haber cesado de radiar el foco sonoro. Este valor tipo de intensidad sonora es difícil de reproducir en la práctica con alguna precisión; pero, afortunadamente, tampoco es necesario, porque, como pronto vamos a ver, el período de reverberación de una sala es más bien materia de cálculo que de experiencia.

Dado que el sonido es una energía, será indestructible, y persistirá indefinidamente a menos de convertirse en otra forma, como, por ejemplo, calor; cuando el sonido, propagándose en la masa de aire confinada en la sala, alcance las superficies de contorno de dicha masa, es decir, las paredes, una parte se transmitirá a través de la misma, otra parte se disipará por fricción en forma de calor, pero una parte, la más importante a los efectos que nos interesa, será reflejada en forma de energía sonora hacia el interior de la sala. La proporción según la cual la energía incidente se reparte en estas tres formas de energía, es función de la naturaleza y material que constituyen las superficies de contorno; la disipada o absorbida está gobernada por la porosidad y flexibilidad de la superficie del material decorativo y también por la flexibilidad del grueso de pared. La mayoría de los materiales usuales de construcción constituyen estructuras rígidas o semirrígidas homogéneas, las cuales pueden adquirir superficies pulimentadas relativamente duras (por ejemplo, ladrillos, baldosines, estuque, cemento, piedras, maderas, etc.), que producen una reflexión muy regular o especular, y la absorción varía entonces entre un 1 y un 4 % de la energía incidente.

Desde el punto de vista del problema que nos ocupa, los efectos de absorción y de transmisión son idénticos, y la suma de ambos recibe el nombre genérico de *absorción;* sin embargo, la transmisión de sonido puede tener una importancia especial cuando se trata de evitar la penetración en la sala de sonidos o ruidos extraños a la misma, esto es, cuando, como sucede en los estudios de Radiodifusión, interesa lograr un gran aislamiento acústico.

En nuestro caso especial, y suponiendo, como es lo usual, que las superficies de contorno son suficientemente gruesas para proporcionar un aislamiento medio eficaz, si se produce un sonido de características definidas dentro del volumen de aire confinado en la sala (y para materiales corrientes de las superficies de contorno), el 96 al 99 % de la energía incidente es reflejada, y, por tanto, el sonido es capaz de experimentar un número grande de reflexiones sobre el contorno, hasta que la energía es absorbida en cantidad suficiente para caer por debajo del límite de audición. Según esto, el período de reverberación debe variar en razón inversa de la absorción, y su definición estará condicionada a salas perfectamente regulares y de dimensiones relativamente pequeñas.

Cuando la forma — y éste es el caso corriente en cines con uno o más pisos — no es regular y las dimensiones son grandes, o posee superficies curvadas o áreas reflectoras regulares capaces de producir

focos o zonas de concentración de sonido, de que antes hemos hablado, el período de reverberación varía de un punto a otro de la sala, y entonces se define lo que se llama *tiempo medio de reverberación*, que es el necesario para que un sonido baje de nivel 60 dB, a partir de su nivel inicial (su intensidad se reducirá en la relación $1 : 10^6$).

Si no existen zonas de concentración de sonido, el tiempo real o medido de reverberación, en cualquier punto de la sala, coincide con ese tiempo medio, pero si se da alguna de aquellas circunstancias, entonces no sólo el tiempo real varía de un lugar a otro, sino que el tiempo de reverberación *inicial*, o medido al principio de su período, puede, aún para un mismo punto de la sala, diferir bastante del tiempo medio antes definido. En tales casos es conveniente evitar dirigir el sonido sobre superficies reflectoras y sobre todas aquellas capaces de prolongar el período de atenuación, y para ello se dirige el sonido sobre el área de audición en que se sitúan los espectadores, aprovechándose de las propiedades directrices de los altavoces.

El beneficio obtenido de esta manera es claro: cada espectador recibe normalmente una combinación del sonido directo, con el procedente de las reflexiones múltiples en la superficie de contorno de la sala. La inteligibilidad es tanto mejor cuanto mayor sea la relación R = Intensidad del sonido directo/Intensidad del reverberante, y esta relación queda muy favorecida mediante aquella orientación del sonido, porque de un lado se logra un máximo del sonido directo sobre los espectadores y de otro se reduce todo lo posible la del sonido reflejado en el contorno, ya que el espectador sólo interviene, como veremos, como elemento difusor y absorbente por excelencia.

Tal distribución no cambia el tiempo medio de reverberación de la sala, pero mejora notablemente el valor de aquella relación de intensidades en el oído del espectador, y es precisamente esa relación lo que da el calificativo de muy *viva* o reverberante a una sala cuya R es pequeña, mientras que la sala se llama *muerta* o apagada cuando R es grande. Una sala muy viva puede hacerse, pues, menos reverberante mediante esta distribución de sonido.

Sin perjuicio de insistir sobre este asunto, podemos ya insinuar que la reverberación en salas de cinemas es solamente perjudicial cuando es excesiva; una pequeña reverberación es conveniente para satisfacer nuestras taras auditivas y hábitos establecidos, mientras que si es excesiva, produce una prolongación del sonido, inarticulada, que hace la conversación extremadamente difícil de entender.

Expresiones analíticas de la reverberación. Para una sala de forma regular y de dimensiones suficientemente pequeñas en la que no haya zonas de concentración y la difusión del sonido sea regular, Sabine ha encontrado que el decrecimiento de energía sonora durante el período transitorio de extinción, o reverberación, viene dado por

$$E = E_0 \, e^{-\frac{a}{\theta} t}$$

donde E_o es la energía sonora en régimen permanente, E el valor que toma en ese período al cabo de un tiempo t, a la fracción de energía que es reflejada en cada impacto del sonido sobre la superficie de contorno, y θ una constante que no es otra cosa que el tiempo medio entre cada dos reflexiones consecutivas, el cual no depende más que de las dimensiones de la sala.

Esta fórmula de alcance restringido, teniendo en cuenta las limitaciones impuestas en su obtención, puede tomar otro aspecto poniéndola en forma logarítmica, lo que está más de acuerdo con el estímulo de nuestro oído; suponiendo que la energía sonora decrece en la relación $E/E_o = 10^{-6}$, esto es, que la diferencia de niveles es 60 dB, nos da, para el tiempo de reverberación τ necesario para tal descenso, y sin más que tomar $\log_{10}$:

$$6 \times 2{,}3 \log 10 = \frac{a}{\theta} \tau \quad ; \quad \tau = \frac{13{,}8\, \theta}{a}$$

si es $c = 340$ m/seg la velocidad del sonido en el aire y llamamos p al recorrido libre medio, será $\theta = p/c$, y mediante un razonamiento análogo al utilizado en teoría cinética de gases, se puede probar que $p = 4\, V/S$, donde V es el volumen de la sala en m^3 y S la superficie del contorno en m^2, con lo cual:

$$\theta = \frac{4\, V}{S c} \quad \text{y} \quad \tau = 0{,}16 \frac{V}{A}$$

en esta expresión $A = S \cdot a$ representa la absorción total de la sala cuando ésta es uniforme; en caso contrario, deberá reemplazarse por:

$$A_1 = a_1\, S_1 + a_2\, S_2 + \dots a_n\, S_n = a\, (S_1 + S_2 + \dots S_n) = aS \qquad (\alpha)$$
$$(\text{si } a_1 = a_2 = a_3 = a_n)$$

donde S_1, S_2 y S_n son las superficies correspondientes a absorciones a_1, a_2 y a_n. Esta fórmula no es correcta más que cuando los incrementos de energía pueden tomarse bastante pequeños para que sea legítimo el proceso matemático de integración que ha conducido a la expresión primera, esto es, para salas vivas o reverberantes con ciertas limitaciones.

Para salas muertas o muy absorbentes en que a es grande y las dimensiones de la sala lo son también, se aplica mejor la expresión de Eyring-Norris, obtenida en 1930 por un proceso de diferencias finitas:

$$E = E_o\, (1 - a) \cdot e^{-\frac{S c}{4 V} t}$$

de la que empleando un método igual al anterior se puede obtener

para el tiempo medio de reverberación la expresión

$$\tau = \frac{0{,}16 \cdot V}{-S \log (1 - a)}$$

y en la que a está dado como en (α) [1].

Mientras que la primera de Sabine sólo es aplicable a salas vivas, esta de Eyring-Norris sólo lo es a salas muertas: en las primeras es $a < 1$, y en las segundas es $a \simeq 1$; en la práctica dan, según los casos, resultados en desacuerdo, a veces contradictorios. Obsérvese, además, que la primera, para paredes totalmente absorbentes, no da $\tau = 0$, sino $\tau = 0{,}16 \frac{V}{S}$, mientras que la segunda da un valor nulo.

Millington en 1932 y paralelamente Sette en 1933 han establecido una fórmula, hasta ahora la más general, para expresión del tiempo de reverberación de una sala:

$$\tau = \frac{0{,}16\ V}{-\Sigma\ S_p \cdot \log (1 - a_p)}$$

en que la suma se extiende a las diferentes superficies que tienen distintos coeficientes de absorción a_p.

La mayor limitación de esta expresión radica en que τ se reduce a cero, si una pequeña superficie de la sala llega a tener un coeficiente $a_p = 1$. La teoría desarrollada por Millington radica en suponer que un rayo sonoro es afectado por cada superficie reflectora en proporción a la razón entre su área y la total de la superficie de contorno de la sala; además, para que sea consistente, hace falta que los rayos sonoros experimenten un número suficientemente grande de reflexiones en cada uno de los materiales absorbentes. A pesar de que esta fórmula no es exacta, es, sin embargo, la que se adapta mejor hoy día a las condiciones prácticas de las salas y a las discrepancias encontradas en las medidas de los coeficientes de absorción.

Materiales absorbentes. Ya hemos dado una idea de cómo se verifica la absorción del sonido. Todos los materiales utilizados tienen ciertas propiedades, de las cuales dependen la absorción del sonido a distintas frecuencias, esto es, lo que se puede llamar su *absorción selectiva*. Por ejemplo, la *deformación plástica* (flexibilidad con resistencia interna) en un material contribuye a una absorción del sonido en las bajas frecuencias, mientras que la porosidad en, o dentro de la superficie exterior del material, afecta principalmente a la absorción de las altas frecuencias. *La estructura* celular de cavidades de aire dentro de la masa de un material produce una absorción restringida de la bajas frecuencias, pero afecta grandemente a las altas.

---

(1) Obsérvese que para a muy pequeño $\log (1 - a) \simeq a$, y entonces esta fórmula concuerda con la de Sabine.

Consideradas ambas propiedades como elementos independientes, según la magnitud en que intervengan en cada material, así modificarán la característica selectiva del mismo. Por ejemplo, un material puede tener una mayor superficie porosa que otro tipo, pero su estructura celular o deformabilidad plástica pueden ser más prominentes en el segundo material. Por consiguiente, la eficacia absorbente del material podrá variar grandemente según que una o varias de esas cualidades sea predominante en cada tipo.

Como consecuencia de ello se deduce que antes de emplear un material, éste deberá ser sometido a una prueba, de cuyo resultado se pueda especificar cuál es su eficacia absorbente para distintas frecuencias. Tales pruebas se hacen para frecuencias que difieren en una octava entre 128 y 4096 c/s, aunque algunos toman una octava por debajo y por encima de estos límites, pero muy frecuentemente, y aun cuando desde luego resulte insuficiente, suele darse el coeficiente de absorción a 512 c/s.

Para una frecuencia determinada, se llama *coeficiente de absorción* de un material, a la relación entre la energía sonora que es absorbida por éste y la total que incide sobre él. Se expresa en tanto por ciento y si la absorción es uniforme u homogénea en toda su superficie, se comprende el interés que tiene determinar este coeficiente, ya que entonces la absorción total se obtiene multiplicando este coeficiente por la superficie en cuestión.

En general, este coeficiente a suele ser menor que uno, y el caso límite con $a = 1$ corresponde a un material absorbente total; tal es prácticamente una ventana de un centímetro cuadrado de superficie abierta en una pared, ya que entonces toda la energía sonora incidente se pierde en el espacio y, por tanto, ninguna es reflejada. Tal coeficiente se llama Sabine, y decir que un material tiene, a una frecuencia fija, un coeficiente del 40 % equivale a decir que sólo absorbe por centímetro cuadrado el 40 % de lo que absorbe un centímetro cuadrado de una ventana abierta, y que, por consiguiente, se precisarán 2,5 cm^2 para lograr la absorción de un sabine. En definitiva, la absorción total vendrá dada, pues, para una absorción uniforme, por

$$A = S \cdot a$$

Es fácil ver que si una pared refleja el sonido reduciendo la amplitud de la onda en un k %, entre este factor y el coeficiente de absorción existe la relación

$$a = 1 - k^2,$$

y, de consiguiente, también podrá definirse el coeficiente de absorción como igual a la unidad menos la relación de la energía reflejada a la incidente, expresado igualmente en tanto por ciento. Según las características especiales de la superficie y del local que debe corregirse, así será distinta la absorción o corrección necesaria para las altas, medias

o bajas frecuencias, y ello mismo demuestra que no deberá emplearse ningún material sin conocer previamente su coeficiente de absorción a estas frecuencias, o, como hemos llamado, su absorción selectiva más adecuada a la corrección que se desea.

Clasificación de los materiales y reglas generales de su uso. Dentro de los límites de esta obra no cabe más que dar una idea general de los mismos, remitiendo, para su estudio más completo, a la obra de Knundsen, u otras monografías referentes al asunto. Dentro de estas limitaciones podremos clasificarlos en: *a)* acolchados; *b)* paneles o cuadros; *c)* fieltros; *d)* enyesados; *e)* piedras, y *f)* baldosines, incluyendo en el grupo de espaciales algunos que no caben en los grupos anteriores.

a) Dentro de este grupo se incluyen todos aquellos que se presentan en forma de mantas, de los cuales el más característico es el americano conocido con el nombre de *rock wool*, constituídos por fibra o lana de madera especialmente seleccionada, y presentan una fuerte absorción a las bajas y medias frecuencias y una cresta aguda en las altas; usadas con cuidado, ofrecen un buen tratamiento acústico para superficies sometidas a fuertes niveles sonoros, pero debido al tipo selectivo de absorción deben emplearse en conjunción con otros tipos de materiales (si su empleo es extensivo), con el fin de compensar su baja absorción a las más bajas frecuencias. Este tipo de materiales debe aplicarse cosido o en colchonetas pequeñas con el fin de evitar que un fuerte impacto de sonido o una vibración de la estructura de la sala altere la característica de absorción del material.

b) En los casos en que se desea un tratamiento económico y no se tiene en cuenta el que éste sea ignífugo, se emplean *paneles de madera* o fibra de caña o junco, que presenta una moderada absorción sobre un amplio intervalo de frecuencias. Este tipo no es adecuado para grandes niveles sonoros, como el que choca sobre la parte posterior de las salas, porque reduce muy poco el nivel de la primera reflexión, y como hemos de ver, el método de instalación tiene gran influencia en las cualidades de estos materiales (véase la fig. 371). En conjunción con otros materiales, pueden dar buenos resultados.

c) Se emplearon mucho en la primera época del tratamiento de cinemas, debido principalmente a la estrecha gama de frecuencias entonces empleada, siendo los preferidos los de pelo, y proporcionando una solución económica; hoy, en cambio, es muy raro el caso de su empleo en las salas de cine, debido principalmente a su excesiva absorción de las bajas frecuencias, siendo a menudo usado para el tratamiento de los escenarios, especialmente en la superficie detrás de los altavoces, por amortiguar el impacto de ruidos y evitar fácilmente el establecimiento de ondas estacionarias.

d) Desde el punto de vista arquitectónico, son materiales de gran aceptación por ser no sólo absorbente, sino uniforme en textura y apariencia. Su absorción es reducida, por lo que su empleo, aún en capas excepcionalmente gruesas, no está indicado aisladamente, sobre todo en grandes áreas que sean especialmente perjudiciales por su

reflexión, como la pared posterior de la sala. Con respecto a ellos, debe tenerse en cuenta, como dijimos antes, para los *b*), su método de montaje, que modifica sus características y también su aplicación; ésta debe hacerse por capas individuales, y cada capa no debe aplicarse hasta que se haya secado completamente la anterior, con el fin de que la humedad sea completamente absorbida y se obtenga la correcta porosidad y estructura celular en la superficie y dentro del material. Sólo deben instalarse por personal especialmente conocedor de sus propiedades.

e) Piedras. Desde hace pocos años se ha lanzado al mercado, en América, un material que puede clasificarse como piedra de construcción y que reúne las propiedades de ser ignífugo, absorbente de sonido y altamente opaco al calor; su natural superficie porosa y la estructura celular no uniforme de su masa contribuyen a la absorción del sonido a frecuencias específicas. Generalmente, son moderadamente absorbentes y selectivos para las altas y medias frecuencias, ofreciendo grandes posibilidades constructivas en los grandes teatros de nueva construcción en que se requieren grandes cantidades de tratamiento acústico, pero su uso debe hacerse en combinación con otros materiales seleccionados que aseguren que su característica de absorción se combina favorablemente con la del otro material, especialmente en las superficies nocivas por la gran reflexión de sonido.

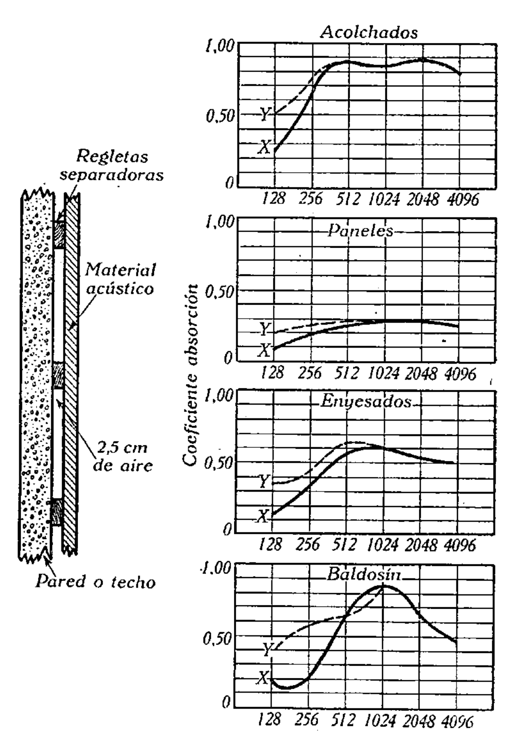


Fig. 371. Características de materiales y modo de aplicarlos

f) Dentro de este grupo se encuentran la mayor diversidad en cuanto a eficacia de absorción y apariencia, existiendo numerosas baldosas o ladrillos fabricados con madera y fibra de caña, que presentan desde una superficie limpia hasta una textura rugosa o perforada. Otros están constituídos con lana mineral y composiciones plásticas a base de amianto y otras fibras minerales. Casi todos son ignífugos, salvo los de madera y caña.

Difieren ampliamente en la cresta de la característica a frecuencias críticas y en la absorción total sobre toda la gama de frecuencias, y con muy pequeño espesor puede lograrse en algunos tipos una moderada, pero uniforme, absorción en toda la gama. Como algunos tipos pueden fabricarse en espesores relativamente pequeños, ello nos da un medio de graduar la absorción necesaria a cada porción del contorno del teatro, según la energía incidente y las particulares necesidades de la sala. La pequeña absorción en baja frecuencia de algunos tipos se debe en gran parte a su método de montaje

En resumen, debemos decir que no hay hoy día ningún material absorbente, ni espesor definido para los mismos, que pueda satisfacer completamente las necesidades de todo teatro y que en cada caso se requiere un estudio especial de los más adecuados a sus propios defectos.

El método de aplicación de casi todos los materiales modifica, especialmente en las bajas frecuencias, su característica de absorción, según se aplique directamente sobre la pared, o a alguna distancia de ella mediante listones o regletas separadoras, pero no afecta sensiblemente a la absorción en las altas. La figura 371 da una idea clara de ello, y en ella se ha designado con X la absorción, cuando se aplica directamente, y con Y la obtenida, si se emplea el sistema de la izquierda para su montaje.

Variación del tiempo de reverberación con la frecuencia. Dado que en las tres fórmulas del tiempo de reverberación que hemos indicado interviene la absorción del contorno, y siendo, como acabamos de ver, ésta selectiva, esto es, variable con la frecuencia, es natural que para definir de un modo preciso el tiempo τ sea indispensable precisar la frecuencia a que se mide. En la mayoría de los casos era la práctica corriente hasta hace poco tiempo especificarla a 512 c/s, falacia que conducía a resultados discordantes en cuanto a la influencia de éste sobre la calidad de la audición, y que no tenía otra base que el hecho de que casi exclusivamente se daba para esa frecuencia el poder absorbente de los materiales. Siendo así que las frecuencias a reproducir son las de una gama extensa, parece natural que se deba determinar también la variación del tiempo τ con la frecuencia.

El primer intento realizado en este sentido para determinar teóricamente cuál es el mejor tiempo de reverberación para cada frecuencia, ha sido dado por Lifschitz en 1926 y MacNair en 1929, los cuales proponen una relación muy simple:

$$\tau \cdot N = \text{constante},$$

donde N es el nivel sonoro correspondiente a cada frecuencia. Según la teoría de MacNair, el cerebro actúa como un instrumento balístico, que no sólo toma en cuenta el valor máximo de la sonoridad, sino que integra ésta a lo largo de todo el tiempo de reverberación.

En la práctica, no obstante, los resultados difieren bastante en algunos casos de esta teoría, debido a otros factores no tenidos en cuenta, especialmente la incertidumbre en la determinación del tiempo τ en salas no regulares, y la forma geométrica de la sala, que requiere un estudio de las reflexiones que experimentan los rayos sonoros. En una sala regular, no hay duda de que en general se obtendrá un solo valor para τ; pero hay razones para dudar de que en una sala con anfiteatros se obtenga el mismo período de atenuación en distintos lugares de la misma, o bien no sea más exacto considerarla descompuesta en tres cavidades separadas, acopladas por las regiones límites del anfiteatro; la figura 372 es muy instructiva a este respecto. Cuando se hace un análisis de un teatro, para las distintas frecuencias, se encuentra que la absorción *normal* (la que se obtiene con las butacas, alfombras, cortinas y superficies interiores diversas) es considerablemente más grande en las medias y altas frecuencias que en las bajas, de donde se sigue un mayor tiempo de reverberación en las bajas frecuencias.

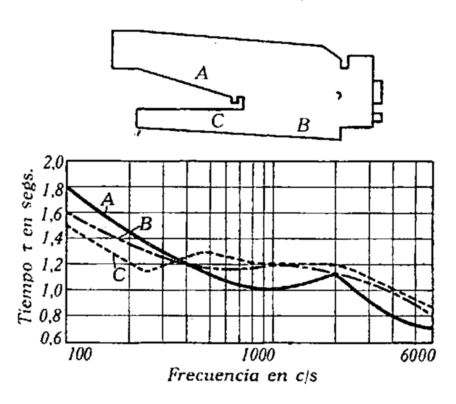


FIG. 372. Tiempo τ en tres posiciones de la sala, versus frecuencia

El problema presenta un aspecto muy distinto, según se trate de un estudio de registro o radiodifusión en que la audición se hace monoaural, del caso de un cinema en que la audición es biaural; por otra parte, no debe olvidarse que el tiempo τ en cinemas debe ser algo menor que en los teatros, pues en estos últimos hay necesidad de aumentarlo en virtud de la ley antes dada de Lifschitz-MacNair, mientras que en cinemas, siendo el nivel medio de la conversación unos 70 dB, puede acortarse dicho tiempo, y, además, viene prolongado por el tiempo de reverberación de la sala de registro que se encuentra inscrito en la misma película, y aunque el tiempo de reverberación sea menor que la suma de los dos, es el caso que por ese hecho queda aumentado.

En definitiva, en el caso de audición biaural, es admisible tomar un τ ligeramente superior para las bajas frecuencias que para las altas y medias, aun cuando esta tolerancia está grandemente gobernada por las dimensiones del local y por las relaciones geométricas y de posición de las superficies de contorno frente al foco sonoro.

Con respecto al volumen, la experiencia ha demostrado que para cinemas pequeños que tengan proporciones favorables, de que más tarde hablaremos, una aproximación estrecha a un tiempo de reverberación uniforme para todas las frecuencias da los mejores resultados en cuanto a la audición, mientras que para cinemas grandes, un pro-

porcionalmente mayor grado de reverberación a las bajas frecuencias es no sólo aceptable, sino en muchos casos deseable. Para asegurar el propio equilibrio de absorción del sonido para las medias, altas y bajas frecuencias, en el promedio de los teatros, el tiempo de reverberación a 64, 128 y 256 c/s no debe exceder al correspondiente a 512 c/s en más de $^3/_4$, $^1/_2$ y $^1/_4$ respectivamente, y para las altas frecuencias desde 1024 a 8192 c/s, no debe exceder en más de $^3/_4$ al correspon-

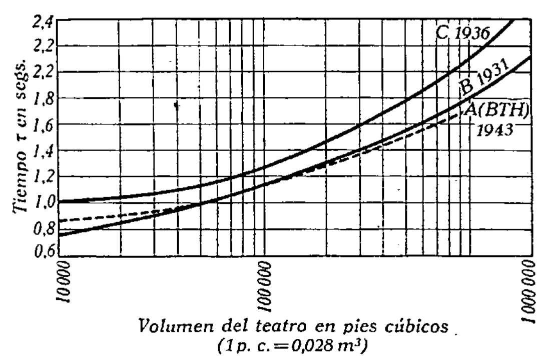


FIG. 373. Tiempo óptimo de reverberación versus volumen

diente a los 512 c/s. Para la frecuencia de 512, el valor óptimo viene dado en función del volumen por la curva *B* de la figura 373, dada en 1931, y mejor aún por la más moderna *C* en 1936, de la S.M.P.E., de América. La curva *A* de la misma figura corresponde a experiencias sobre un número pequeño de cines de la firma British Thomson Houston, en noviembre de 1943.

Importa hacer notar a este respecto que un exceso de reverberación en las bajas frecuencias da al sonido, y particularmente a la voz, una apariencia hueca *(boomy)*, mientras que una falta o pequeña reverberación en las altas hace perder *presencia* a la conversación, tan esencial en el silabeo de la conversación y brillantez de la música.

Un factor muy importante del que no hemos hablado apenas, pero cuyos efectos son empíricamente conocidos de los empresarios que explotan salas de cine, es la naturaleza de los asientos y el número de espectadores que ocupen el local; se admite que por término medio un espectador absorbe 4,7 sabines, y dado que el número de éstos es muy variable, debe procurarse compensar su ausencia mediante el empleo de butacas tapizadas, que absorben aproximadamente los $^2/_3$ de lo que corresponde al espectador, mientras que la que corresponde a asientos de madera es sólo $^1/_{20}$ de aquélla por espectador. Los cálculos del tiempo a 512 c/s se hacen siempre sobre la base de que el local se encuentre ocupado en sus $^2/_3$ de la máxima capacidad.

Volumen y dimensiones más apropiadas de una sala. Puede decirse sin gran error que más del 85 % de los cinemas construídos en América

están diseñados para contener un número de espectadores no superior a 800, y aparte de otras ventajas económicas o estéticas, presentan la muy importante de controlar mejor que en los grandes locales la distribución de sonido y su buena reproducción; el máximo volumen por asiento se calcula en 150 pies cúbicos = 4,2 m³, y cuanto menor sea éste, tanto menor, a igualdad de otras circunstancias, será el tiempo de reverberación, y, consecuentemente, menor será la necesidad de aplicar tratamientos acústicos adecuados. La tabla siguiente, dada por Potwin en la S. M. P. E., en 1940, nos da en pies y metros cúbicos los volúmenes por asiento más aceptables para un número variable de estos.

Número de asientos	Volumen por asiento	
	Mínimo	Máximo
350	110 = 3,08 m³	120 = 3,36 m³
500	112 = 3,14 »	123 = 3,44 »
750	115 = 3,20 »	128 = 3,58 »
1000	119 = 3,33 »	133 = 3,72 »
1250	122 = 3,42 »	139 = 3,89 »
1500	125 = 3,50 »	144 = 4,03 »

En cuanto a las dimensiones, se considera como un principio establecido como resultado de la experiencia en gran número de locales ya construídos, que las mejores para permitir el control de las reflexiones sobre el contorno y la mejor distribución del sonido son: longitud de la sala propiamente dicha igual a dos veces y media la altura de la misma, y anchura igual a vez y media su altura; esto es, representando por h su altura, por a el ancho y por l el largo, se tendrá:

$$l = 2{,}5 \times h; \quad a = 1{,}5 \times h.$$

Es claro que, en general, en las grandes ciudades, no será muchas veces fácil encontrar solares que reúnan estas dimensiones relativas para la edificación de un nuevo cine; pero en todo caso habremos de aproximarnos cuanto sea posible a este ideal, y en todo momento tomar las medidas necesarias para prevenir los defectos acústicos que puedan originarse por desviaciones de estos valores, con arreglo al estudio geométrico que damos a continuación.

Estudio geométrico de una sala mediante pruebas impulsivas con el oscilógrafo. Existen diversos sistemas de medir el tiempo de reverberación de una sala, que no caben en los límites de estas obra, pero, de todos ellos, el que emplea el oscilógrafo de rayos catódicos tiene la ventaja de que permite determinar los tiempos transcurridos entre las diversas reflexiones primordiales, y ello puede ayudarnos a averiguar sobre qué paredes del contorno se realizan y cuál es el recorrido de los rayos sonoros; así estaremos en camino de prescindir de deter-

minadas formas de salas como no aptas para la reproducción sonora, y de saber cuál es la forma y coeficientes de absorción más adecuados a cada pared de la sala (¹).

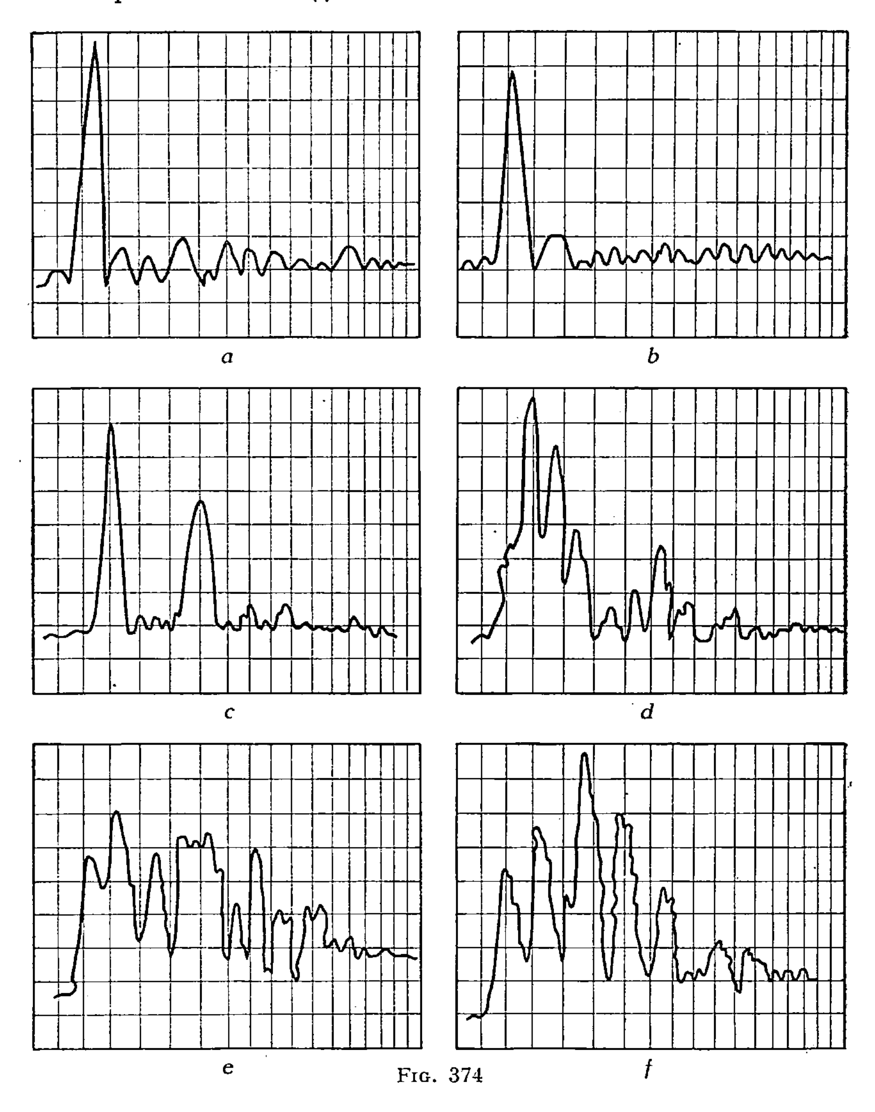
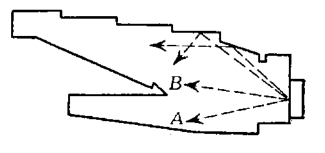


Fig. 374

Las figuras 374 *a* y *b* muestran dos imágenes oscilográficas obtenidas en un gran teatro, donde la calidad del sonido era uniformemente

(¹) Véase en esta misma colección nuestra obra *El oscilógrafo de rayos catódicos y sus aplicaciones*. Editorial Labor, S. A.

muy buena, y cuya geometría se muestra en la figura 375. El tratamiento absorbente se limita a la pared posterior, estando el suelo cubierto de gruesa alfombra y los asientos tapizados con material muy absorbente. En la figura 375 puede verse que la forma del auditorio es tal que para la posición *A* casi todo el sonido es directo, no siendo posible reflexiones de las paredes laterales ni del techo, de acuerdo con lo mostrado en el oscilograma de la figura 374 *a*. La posición *B* indica la posibilidad de alguna reflexión del techo, y ello se muestra también en el oscilograma de la figura 374 *b*. La reflexión, no obstante, es de poca amplitud y está separada de la fundamental por un pequeño intervalo de tiempo, no causando deformación en la calidad del sonido. En la posición *C*, la posibilidad de reflexiones es grande, pero la diferencia de caminos es pequeña, y la máxima diferencia entre los ángulos de incidencia subtendidos es pequeña. Por esta razón, la deformación producida por las reflexiones es pequeña, y de ello nos ocuparemos después.



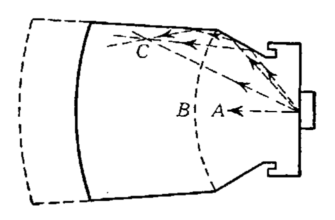


FIG. 375. Ejemplo de un buen diseño de acústica

La figura 376 muestra una sala donde la calidad del sonido es muy buena, excepto en algunas zonas que vamos a considerar. La forma y tratamiento acústico de la sala son tales, que se aplican los mismos argumentos que para el caso anterior, en relación con la ausencia de reflexiones; una zona mala es la indicada en la posición *B*, en el centro y debajo del anfiteatro, y el oscilograma para esta posición se muestra en la figura 374 *c*. En ella se ven reflexiones de la pared posterior con un retraso de 80 milisegundos. Una reflexión posterior con un retraso de 220 miliseg., que aparece, es, sin duda, debida a la pared posterior encima del anfiteatro en el techo y en la parte curvada del arco de proscenio, y otra en los lados, tal como se indica en la figura 374 *c*. La experiencia muestra que un eco con menos de 45 miliseg. de retardo, de la pared posterior, puede tolerarse, pero un eco con un retardo de más de 50 miliseg. deteriora el sonido por falta de inteligibilidad en la conversación. Conviene hacer notar que la respuesta en frecuencias, para las posiciones *A* y *B*, son semejantes y satis-

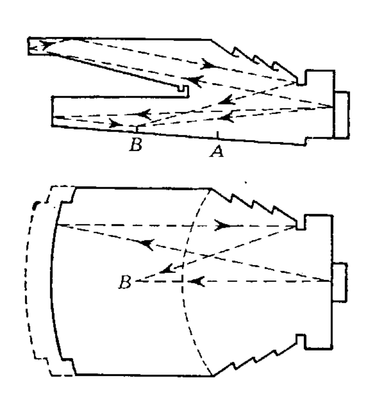


FIG. 376. Ejemplo de una sala con reflexiones locales de sonido

factorias, sin que sea posible sacar de ellas conclusiones respecto a la calidad del sonido.

Las figuras 377 y 378 muestran una sala donde la calidad del sonido es mediana, siendo el principal defecto la falta de coherencia entre imagen y sonido. La forma de esta sala se muestra en ambas figuras, en las que se ve claramente un techo y paredes extensas y paralelas hasta considerable distancia, y sólo se ha aplicado tratamiento absorbente en la pared posterior. Para la posición del micrófono mostrada en esas figuras, se obtiene el oscilograma de la figura 374 *d*. El retardo de los impulsos reflejados indica que el sonido llega al centro de la sala por reflexión en las paredes laterales, reflexión en el techo, reflexión del espacio angular entre la pared lateral y el techo, y una pequeña cantidad de reflexión de la pared posterior. Como el retardo relativo de todas estas reflexiones es corto, hay muy pequeña interferencia y buena inteligibilidad, pero la dirección de la cual el sonido emana es poco marcada, resultando una falta de coherencia con la acción de la imagen en la pantalla De la marcha de los rayos en las figuras 377 y 378 se observa que el ángulo sólido subtendido por un sonido incidente en el centro de la sala es mucho mayor que el subtendido en la posición *C* de la figura 375, lo que nos permite darnos cuenta de la menor coherencia en este tipo de teatro.

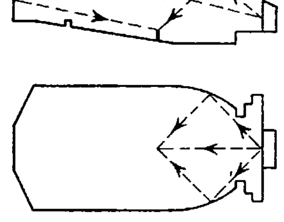


FIG. 377. Ejemplo de un teatro con coherencia de imagen y sonido deficiente

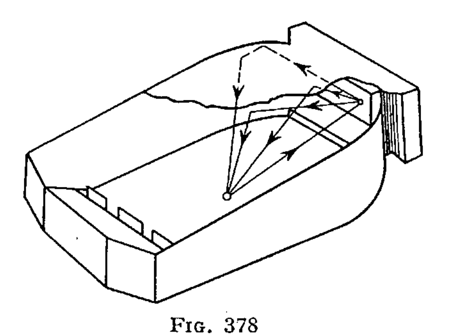


FIG. 378

La sala mostrada en la figura 379 tiene una calidad de sonido muy deficiente, y en ella inteligibilidad y coherencia son muy pobres. Las figuras 374 *e* y *f* muestran los registros de tiempo para dos posiciones típicas; ellos indican grandes reflexiones a largo y corto intervalo de retraso, y explican la pérdida de inteligibilidad y coherencia a pesar de que la respuesta a las frecuencias y el tiempo de reverberación eran completamente satisfactorias.

Requerimientos de un buen diseño de una sala de cinema. Como ya hemos anticipado, el buen diseño de la acústica es resultado de la coordinación del trabajo del arquitecto, el ingeniero de diseño del equipo y del especialista en acústica; sin embargo, el factor predominante para la obtención de una buena acústica es, tal vez, el control de las reflexiones en las paredes de contorno, aunque esto no quiere decir

que se prescinda de las otras condiciones. Pueden considerarse cuatro factores a los que conviene prestar especial atención:

a) El tiempo de reverberación (teatro vacío) debe ser el óptimo de la curva de la figura 373.

b) La característica de reverberación versus frecuencias, debe ser el que con valores numéricos indicamos en otro lugar.

c) Evitar caminos de reflexión sonora que excedan al directo en más de 45 pies, 13,5 m. La experiencia prueba que tales caminos reducen la inteligibilidad.



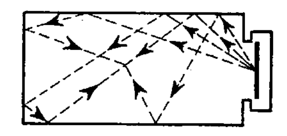


FIG. 379. Teatro en el que inteligibilidad y coherencia son malas

d) Los caminos de reflexión inevitables deben subtender un pequeño ángulo en cualquier punto de la sala, si se quiere que la coherencia de imagen y sonido no sea excesivamente pobre.

Con los métodos actuales de construcción y moblaje, la condición *b*) queda, casi siempre, automáticamente satisfecha, cuando se cumple la condición *a*).

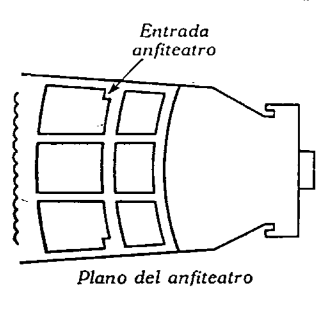
Con los mismos métodos actuales de construcción y moblaje es probablemente imposible satisfacer la *a*) con el teatro lleno, pero la reproducción será muy mejorada si tal condición puede satisfacerse con aproximación; otro tanto se aplica a *b*).

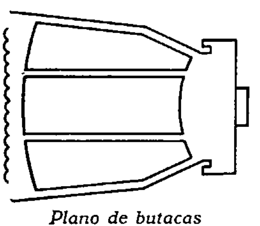
La condición *c*) se refiere a caminos cuyo retardo relativo no exceda de 40 miliseg. La mayoría de los teatros de reciente construcción de 1000 a 1500 localidades que satisfacen a tal condición tienen el aspecto de la figura 380, en el que se ha adoptado la estructura de un anfiteatro, estando el techo principal escalonado hacia el arco del proscenio con el fin de reducir el volumen de aire confinado y precio de construcción. Este tipo de reducción en la altura del techo hacia el proscenio tiene sus ventajas.

Las reflexiones desde el techo hacia los espectadores siguen un camino que no difiere mucho en cuanto a longitud del sonido directo del altavoz, y además facilita grandemente la difusión del sonido mediante la disposición escalonada.

Los tiempos de reverberación de los tres principales espacios que se forman en el teatro tienden a igualarse, evitando que un flujo de energía pase de un espacio con gran tiempo de reverberación a otro que lo tenga bajo. La abertura del proscenio es ensanchada con unas paredes laterales inclinadas que incluyen un ángulo de 80° a fin de que el flujo de energía siga paralelamente esas paredes. Debe tenerse en cuenta que dichas paredes no necesitan reforzar el sistema sonoro, y, por consiguiente, su superficie debe romperse con columnas, paneles u otros motivos decorativos. Finalmente, las paredes laterales no deben mantenerse paralelas hasta la pared posterior, con el fin de reducir el tiempo necesario para lograr la difusión completa del sonido dentro de la sala.

La pared posterior curvada ha sido eliminada, y en su lugar se emplean paredes inclinadas hacia delante con el fin de que el sonido reflejado caiga sobre las filas posteriores de butacas y compense el nivel normalmente bajo en dichas filas por efecto de la propagación desde delante, y para evitar la producción de ecos de gran retraso si el sonido fuese dirigido hacia la pantalla o primeras filas. Las puertas o accesos se colocan, en planta baja y anfiteatro, junto a las paredes laterales, en los sitios difíciles de cubrir con sonido directo.





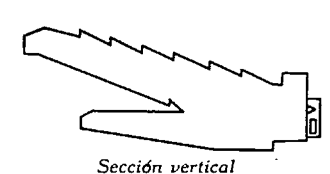
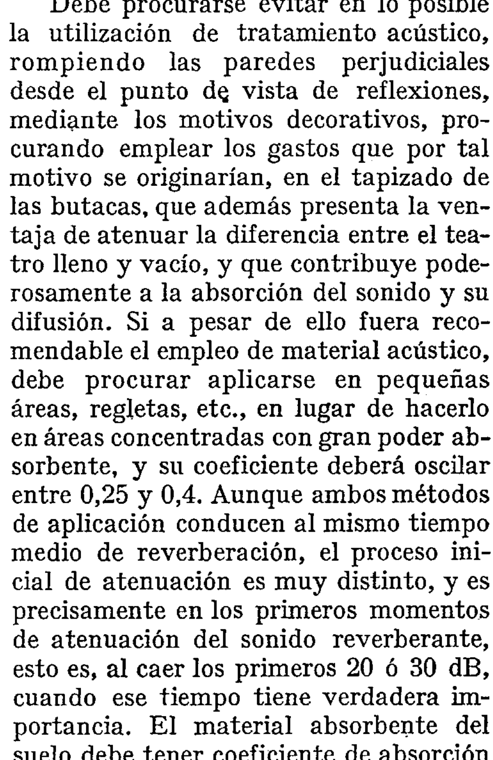


FIG. 380. Óptimas proporciones y disposición de un teatro para 1000 a 1500 localidades



Debe procurarse evitar en lo posible la utilización de tratamiento acústico, rompiendo las paredes perjudiciales desde el punto de vista de reflexiones, mediante los motivos decorativos, procurando emplear los gastos que por tal motivo se originarían, en el tapizado de las butacas, que además presenta la ventaja de atenuar la diferencia entre el teatro lleno y vacío, y que contribuye poderosamente a la absorción del sonido y su difusión. Si a pesar de ello fuera recomendable el empleo de material acústico, debe procurar aplicarse en pequeñas áreas, regletas, etc., en lugar de hacerlo en áreas concentradas con gran poder absorbente, y su coeficiente deberá oscilar entre 0,25 y 0,4. Aunque ambos métodos de aplicación conducen al mismo tiempo medio de reverberación, el proceso inicial de atenuación es muy distinto, y es precisamente en los primeros momentos de atenuación del sonido reverberante, esto es, al caer los primeros 20 ó 30 dB, cuando ese tiempo tiene verdadera importancia. El material absorbente del suelo debe tener coeficiente de absorción bajo, y para las paredes laterales este coeficiente de absorción debe ser bajo, entre 0,2 y 0,4. Finalmente, debe evitarse en lo posible el uso de materiales absorbentes en el techo por peligroso, y en muchas ocasiones innecesario, ya que el sonido reflejado del suelo y techo suele ser fuertemente atenuado por las butacas y alfombras.

Ejemplo de corrección acústica. Por último, y para terminar este capítulo, nos queda mostrar la manera de asegurar hasta dónde es posible, mediante el cálculo, el tiempo de reverberación más adecuado y los medios a nuestro alcance para lograrlo. Ello se comprenderá mejor mediante el ejemplo que damos a continuación.

Supongamos un teatro con una capacidad para 2000 espectadores y con un volumen de 400 000 pies cúbicos = 11 200 m^3, lo que representa unos 200 pies cúbicos por espectador, valor ligeramente superior al más correcto de 150 máx., que antes hemos especificado. Aun cuando los cálculos los haremos en unidades americanas, se pasa fácilmente a las nuestras teniendo en cuenta que un pie cúbico vale 0,028 m^3 y un pie cuadrado vale 0,093 m^2, y, por consiguiente, cuando las superficies se den en m^2, los coeficientes de absorción, dados a continuación, habrán de dividirse por 0,093.

Un análisis de las diferentes áreas y sus coeficientes de absorción da:

Material	Superficie en pies cuadrados	Coeficiente de absorción	Unidades de absorción
Yeso duro	32,100	0,025	803
Paneles madera	11,373	0,06	682
Madera barnizada	804	0,02	24
Vidrio	500	0,027	13,5
Metal	744	0,01	7,4
Ventiladores	280	1,00	280
Asientos (madera)	2,000	0,1	200
Alfombras	4,473	0,03	134
			2,144
Auditorio medio	1,340	4,6	6,160
máximo	2,000	4,6	9,200

(Nótese que se emplea por expectador 4,6 y no 4,7, puesto que 0,1 figura ya para el asiento).

Empleando la expresión de Sabine, para el tiempo de reverberación, con estas unidades $\tau = 0{,}05 \frac{V}{A}$ encontramos:

τ sin espectadores	9,3	segundos	(A = 2,144)
τ para 2/3 de espectadores	2,4	»	(A = 8,304)
τ para la sala llena	1,675	»	(A = 11,344)

Pero de la curva de la figura 373 se ve que el tiempo óptimo de reverberación, para los 2/3 de espectadores, vale 1,81 seg., y, por consiguiente, el teatro resulta excesivamente reverberante. Para aproximarnos a las condiciones óptimas, deberemos introducir en la sala una absorción A = 11,000 — 8,304 = 2,696 unidades.

Para empezar, podemos reemplazar las sillas de madera por butacas tapizadas, y el piso alfombrado o recubierto en corcho por una gruesa alfombra de lana; el efecto de estos cambios será:

Absorción debida a las sillas tapizadas = 2,000 (2,0 — 0,1) = 3,800.

Absorción debida al tapizado = 4,473 · (0,20 — 0,03) = 755 unidades.

De este modo hemos incrementado la absorción sin espectadores en 4,555 unidades y la absorción total será ahora 6,700 unidades.

Para un auditorio medio de 1,300 espectadores la absorción total será:

6,700 + 1,340 (4,7 — 2,0) = 10,330, y el correspondiente tiempo de reverberación será ahora: 1,935 seg.

Con ello estamos más cerca de la condición óptima; pero si queremos una mejor aproximación, deberemos introducir todavía una absorción de 11,000 — 10,330 = = 670 unidades. Supongamos que decidimos emplear un material correctivo cuyo coeficiente de absorción sea 0,335: el área necesaria en pies cuadrados será:

$$\frac{670}{0{,}335 - 0{,}025} = 2{,}160$$

Ello puede lograrse colocando paneles en la pared posterior y en forma de listones, como hemos indicado antes en las paredes laterales: los primeros presentan la ventaja en algunos casos de reducir notablemente la reflexión de la pared posterior, que, como es sabido, casi siempre es perjudicial.

El tiempo de reverberación de la sala así corregida será ahora:

τ sin espectadores	2,73 seg
τ para los 2/3 de espectadores	1,81 »
τ para la sala llena	1,57 »

De este modo, como se ve, hemos reducido el efecto de los espectadores muy considerablemente, si bien, para salas pequeñas y en el caso de cinemas, tal tiempo puede resultar todavía excesivamente grande y, por consiguiente, la sala un poco reverberante. Como quiera que sólo se ha hecho el estudio de la reverberación a 512 c/s, la corrección anterior dista mucho de ser completa, pero lo dicho basta para que el lector se dé una idea de la forma de emprender este tipo de problemas.

Efectos de la ventilación. Aun cuando en la mayoría de los casos su influencia no contribuye grandemente en las condiciones acústicas finales, dado que después, en el capítulo siguiente, nos vamos a ocupar de este problema, que reviste especial interés en las salas de cine actuales, conviene tener en cuenta algunas observaciones sobre la influencia de las corrientes de aire a distinta temperatura. Las variaciones locales de temperatura, tales como las que se originan cuando se produce una columna de aire ascendente caliente procedente de un hueco de ventilación localizado en las proximidades del suelo, puede dar lugar a un efecto de reflexión y una disminución de la intensidad del sonido. Una columna de aire caliente y cilíndrica actúa como una lente divergente (por su menor densidad), con la consecuencia de una disminución de flujo de sonido recibido a través de ella por unidad de área de recepción, y provoca una reflexión en la zona de contacto del aire frío con el caliente. Estos efectos, aunque ocasionalmente pueden presentarse, raramente dan lugar a efectos notables, excepto en salas con muy largos períodos de reverberación. Vemos, pues, que una homogeneidad en la temperatura es un elemento conveniente para la buena acústica, pero no ofrece peligro un aumento o descenso en la temperatura *total* de la sala.

Aislamiento de ruidos. Salvo casos excepcionales, el ruido más mportante a tener en cuenta en un cinema proviene de las máquinas mismas del sistema instaladas en la cabina; debe procurarse a toda costa evitar que éste alcance a la sala con un nivel que podría dar lugar a distraer al espectador molestamente y a un enmascaramiento del sonido reproducido, en los pasajes flojos, tal como se explicó en el Capítulo X.

Este ruido puede penetrar en la sala, bien directamente por las ventanillas de proyección y observación situadas en la pared de la cabina, cuando no se hallan convenientemente protegidas con vidrios, bien por propagación directa de las vibraciones a través de las paredes y muros de la cabina. De aquí la necesidad de aislar acústicamente la

cabina cuanto sea posible, procurando un desnivel de a lo menos unos 40 dB entre las dos caras de sus superficies, y, a ser posible, haciendo sus paredes independientes acústicamente del resto de la estructura de la sala.

Otro tanto podría decirse de cualquier sala de máquinas auxiliares de algún servicio, como ventilación, etc., que se encuentre enclavada en la misma estructura de la sala: ascensores, bombas, etc.

XXII. Climatización o acondicionamiento de aire de locales [1]

Ideas generales. La práctica más elemental seguida hasta hace pocos años, no sólo en locales de espectáculos, sino hasta en edificios públicos y viviendas, para defenderse de los rigores del tiempo motivados por las distintas estaciones del año (especialmente en nuestro país, durante el invierno), ha consistido en calentar el aire mediante radiadores por el interior de los cuales circulaba una corriente de agua, vapor o aceite, calentados en una caldera central, y convenientemente distribuídos en el local.

En verano, raramente, hasta hace una decena de años, se acudía a la refrigeración o enfriamiento del aire, y cuando se ha comenzado a hacer se ha procedido con la misma falta de precaución que se sigue para la calefacción, cual es la de no tener en cuenta para nada las condiciones de salubridad y confort del aire que llena los locales, el cual ha de servir, no sólo para robar o ceder calor al organismo humano, sino para absorber el vapor de agua que se desprende del mismo y para hacerlo adecuado para la respiración; en una palabra, hace falta que ese aire reúna condiciones saludables y confortables, y ello no puede lograrse por ninguno de los dos sistemas anteriores aisladamente, sino agregando, además, un sistema de climatización o acondicionamiento del mismo; veamos qué factores intervienen en la determinación de tales condiciones.

Una persona adulta, aun en estado de inactividad, desarrolla calor a razón de 400 BTU por hora, o sea 100,8 kcal/h [2], como término medio, y desprende también vapor de agua en una proporción

---

(1) Para un estudio más completo véase nuestra obra *Manual de climatización y acondicionamiento de aire*, en preparación.

(2) BTU es la abreviatura de British Thermal Unit, unidad empleada por ingleses y americanos que representa la cantidad de calor necesaria para elevar 1° F la temperatura de una libra de agua; es fácil ver, después de la definición de la kilocaloría, que entre ambas unidades existe la relación

$$1 \text{ BTU} = 0{,}252 \text{ kcal, es decir, } 1 \text{ kcal} \cong 4 \text{ BTU}$$

de 37 gramos en igual tiempo; se comprende, pues, que en un local cerrado en que hay acumulada mucha gente, y no hay pérdidas grandes de calor por conducción a través de sus paredes, este calor y humedad se van acumulando hasta hacer la atmósfera insoportable. El medio más natural de absorber y ceder calor y humedad al organismo es utilizar el aire que lo rodea, y de ahí la necesidad de renovarlo; pero esta renovación tiene que ser continua y constante y hacerse teniendo en cuenta cuatro factores importantes: temperatura, humedad, movimiento y pureza.

a) La influencia de la *temperatura* se comprende fácilmente si se tiene en cuenta, como hemos dicho antes, que para que haya un flujo de calor entre el organismo y el aire, se precisa que exista entre ellos una diferencia de temperatura; según el signo de esta diferencia, así el organismo absorberá o cederá calor del aire, y si además se recuerda que la temperatura normal del organismo suele ser de unos 36,5° C, se ve claramente que debe existir una limitación en la temperatura que debe tomar el aire ambiente para que el cuerpo pueda desprender o absorber calor al ritmo necesario para mantener su temperatura, y que esa limitación será distinta según se trate de verano o invierno. Por otra parte, y dado que, a igualdad de presión, la tensión de saturación de vapor en el aire crece a medida que aumenta su temperatura, también, por esta causa, debe existir una limitación en la temperatura.

b) En cuanto al vapor de agua contenido en el aire, o, como también se dice, su *estado higrométrico*, su influencia ha sido despreciada, sin tener en cuenta que además de permitir más fácilmente la absorción de la exhudación de la piel, cuanto menor sea la humedad relativa de aquél, constituye uno de los medios más eficaces de enfriar el organismo, la evaporación del agua que como consecuencia de la transpiración de la piel se deposita en ésta, especialmente en la época de calor y como defensa de aquél contra el mismo. Es sabido que cuando el agua se evapora absorbe una gran cantidad de calor, cantidad que es fija por cada litro de agua, para una temperatura y presión constantes; esto nos da la explicación del efecto refrescante que se observa exponiendo la piel a una corriente de aire especialmente después de sudar; cuanto mayor sea la humedad relativa del aire, menor será la evaporación de la piel, y de aquí que en invierno, en que el aire suele ser muy seco, el enfriamiento sea mayor por esta causa que en verano, en que el aire es más húmedo, a igualdad de temperatura.

c) El ritmo de transferencia de calor y de evaporación en la piel puede acelerarse aumentando la velocidad de renovación del medio conductor en contacto con la piel, esto es, del aire; si ese aire se encuentra en reposo, de un lado se reduce paulatinamente la diferencia de temperatura, y, por tanto, el tránsito de calor, y de otro se aumenta progresivamente el porcentaje de humedad relativa del aire, reduciéndose de ese modo la vaporización en la piel y, de consiguiente, aquel efecto refrescante. Ello nos dice, de otra parte, que, a menos de circunstancias excepcionales, no debe exponerse el organismo a una

rápida corriente de aire y que es siempre preferible mover grandes masas de aire con una pequeña diferencia de temperatura con respecto al organismo, que, por el contrario, emplear pequeñas masas con diferencias de temperatura grandes.

d) Finalmente, para que la respiración sea eficiente se requiere, además, que el aire sea limpio y normal; en este aspecto cabe decir que las cantidades relativas de oxígeno y anhídrido carbónico en el mismo tienen, dentro de ciertos límites, poca importancia siempre que ese aire se renueve con frecuencia, siendo mucho más perjudicial para los pulmones las partículas de cualquier clase en suspensión o el polvo, etc., que un pequeño exceso de anhídrido carbónico, lo que ha dado lugar a un grupo patológico de enfermedades conocido con el nombre de *silicosis* (1).

Cada uno de estos factores tiene una marcada influencia no sólo en las condiciones de confort del ambiente, sino incluso y normalmente en las condiciones de trabajo de las personas y rendimiento del mismo; así, la razón fundamental de no acudir el espectador en verano a cinemas y teatros radica casi siempre en las malas condiciones de la atmósfera que se crea en locales no acondicionados, en cuanto se refiere a elevación de temperatura y exceso de humedad, mientras que una atmósfera muy seca produce efectos irritantes en la piel en razón de una rápida evaporación, y especialmente en las mucosas respiratorias.

El British Industrial Fatigue Board ha comprobado, después de una serie de estudios y estadísticas, que durante el verano en oficinas, fábricas y talleres no acondicionados, hay un descenso en la producción sobre el valor medio normal de un 30 %, mientras que en locales acondicionados el incremento medio en la producción a lo largo del año es de un 10 % sobre la media normal en condiciones de no climatización.

Condiciones confortables más adecuadas en un local. Esto nos lleva de la mano a plantearnos el problema de cuáles son las condiciones del ambiente más adecuadas que debemos procurar mantener en una atmósfera limitada como la de un local cerrado; como la presión se mantiene sensiblemente constante, las características físicas del aire quedarán reducidas a dar su estado higrométrico y su temperatura.

Los valores precisos de estas constantes físicas varían según las condiciones climatológicas de cada país, pero de los resultados subjetivos llevados a cabo por W. H. Carrier y C. P. Yagoglou, de la Carrier Engineering, y confirmados por O. W. Amspach y el especia-

(1) A este respecto es interesante leer el libro del Dr. William Gordon, *The Influence of Strong, Prevalent, Rain-bearing Wind on Prevalence Phthisis,* donde se estudia la influencia de la humedad y factores climáticos en las enfermedades de las vías respiratorias.

lista en tales cuestiones Dr. Huntington, de Londres, sobre un gran número de personas, se ha podido establecer que tales condiciones son, en invierno:

Temperatura 70° F = 21° C Humedad relativa: el 55 %

mientras que las condiciones más favorables en verano son:

Temperatura 65° F = 18,3° C Humedad relativa: el 65 %

Para evitar distinciones, y puesto que aquellas condiciones no son críticas, al mismo tiempo que nos adaptamos mejor a las características propias de nuestro país, adoptaremos como más adecuadas para una sala de espectáculos las siguientes:

Termómetro seco:	$T_s = 80°$ F = 26,6° C	Véase carta psicrométrica (fig. 383).
Termómetro húmedo:	$T_h = 67°$ F = 19,4° C	
Punto de rocío:	$P = 60°$ F = 15,5° C	
Humedad relativa:	50 %	

Estos valores nos determinan el punto P de las condiciones interiores, en la carta psicrométrica de que hablaremos después. Para mantener, juntamente con estas condiciones, las de pureza y una limitada diferencia de temperatura entre el aire que penetra en la sala y el contenido en la misma, se requiere un volumen de aquél determinado, que fijaremos más adelante atendiendo a condiciones más precisas.

Factores que deben controlarse para un ambiente confortable. En definitiva, como acabamos de ver, conviene mantener bajo control en un sistema de climatización, la temperatura, la humedad, el movimiento o circulación de aire y su pureza. En lo que se refiere a la temperatura, las instalaciones actuales pueden mantenerla dentro de una variación máxima de 1° F = 0,55° C, para variaciones de la carga en el equipo, motivadas, bien sea por un cambio en las condiciones del medio exterior, o por variación en el número de ocupantes o espectadores, a veces muy grandes, como sucede en las salas de espectáculos. Para la humedad, ese control permite mantenerla, y por iguales causas de variación, dentro de un 2 %.

Veamos en qué medida se puede lograr mantenerse próximo a esos valores en determinadas circunstancias, con los sistemas clásicos de calefacción y refrigeración que no tienen en cuenta el estudio cuantitativo de las condiciones físicas del aire. En primer lugar, debemos decir que el procedimiento tan a menudo empleado de suministrar aire caliente en inverno mediante ventiladores de absorción, ofrece el peligro de elevar excesivamente la temperatura en los momentos de gran acumulación de espectadores; el único paliativo entonces consiste en cortar el flujo de aire caliente, pero ello tiene el inconveniente

de reducir la ventilación o la renovación de aire precisamente en el momento que se hace más necesaria, elevándose además la humedad por efecto de la respiración; al cabo de poco tiempo, la atmósfera se hace irrespirable, por lo que este sistema es desde luego incompleto.

En salas no muy llenas de público, las paredes y muebles absorben una gran cantidad de calor, asegurando una temperatura razonable, en tanto que las pérdidas por ventanas, puertas y demás aberturas son suficientes para eliminar el exceso de humedad acumulada; estos medios naturales de mantener condiciones confortables son insuficientes en salas densas y continuamente ocupadas por el público; en tales casos, hay necesidad de renovar artificialmente el ambiente para eliminar aquel exceso de calor y humedad. Si el aire se toma directamente de la atmósfera exterior, se precisará, pues, que tenga una temperatura inferior a la que tiene en la sala, y otro tanto puede decirse respecto a la humedad. Pero las condiciones varían mucho según se trate de una u otra estación del año; en invierno en que el aire atmosférico es seco y frío, éste puede emplearse con relativo éxito para reducir calor y humedad; cuando la sala está totalmente llena, ni siquiera a veces se requiere calefacción, y el problema queda reducido a eliminar humedad; en cambio, si está mediada o poco concurrida, el aire exterior puede, unido a las pérdidas de las paredes, producir un descenso de temperatura sin aumentar grandemente la humedad, y entonces la sola calefacción puede ser suficiente.

Por el contrario, en las otras estaciones del año, particularmente en verano, el aire exterior deja de ser eficaz para aquella finalidad, especialmente si su humedad relativa es elevada (1), y se requieren medios artificiales para enfriar y desecar la atmósfera.

Cuando el aire exterior es muy seco se procede, antes de hacerlo penetrar en la sala, a aumentar su humedad; el sistema generalmente empleado consiste en hacerle atravesar una cortina de agua pulverizada. Cuando lo que se intenta es solamente un efecto de enfriamiento utilizando el aire exterior, debe procurarse que la temperatura de éste no sea inferior a la del interior en más de 10° F = 5,5° C, si es que se quiere evitar los peligros de resfriados en el público; el mejor medio de lograrlo consiste en *recircular parte del aire de la sala mezclándolo en proporciones adecuadas con el exterior*, y en este sencillo principio se fundan casi todos los sistemas actuales de acondicionamiento de locales.

Influencia de la naturaleza del local. Las condiciones del equipo de acondicionamiento varían mucho aun dentro de ese principio, en

(1) Con verdadera sorpresa hemos podido comprobar que en muchos locales el sistema de refrigeración consiste en una corriente de aire exterior humedecida previamente a su entrada hasta casi la saturación, lo que impide en gran medida la eliminación de la humedad cedida por los espectadores en dicha época, siendo tal práctica contraproducente, ya que por lo general las corrientes de aire toman en tales sistemas grandes velocidades.

relación con las características del local y según sea éste un edificio público, una sala de fiestas, un estudio de radiodifusión o un teatro o cine, para no citar más que los más típicos.

Limitándonos al último, que es el que aquí nos interesa, el problema de la ventilación presenta grandes dificultades debido a las muchas horas del día durante las cuales se encuentra en uso continuo, y a las grandes variaciones de carga calorífica e higrométrica motivada por variaciones también grandes en el número de personas que lo ocupan.

Durante el verano y desde el momento en que el público comienza a penetrar en la sala, el mantenimiento de condiciones confortables depende, en gran parte, de una adecuada provisión de suministro de aire seco y frío, distribuído a través de todo el auditorio de una manera lenta y uniforme. El sistema ideal para lograrlo es el de *difusión vertical descendente*, en el que el aire entrante lo hace al nivel del techo y desciende y se difunde lentamente en virtud de su mayor peso comparado con el del aire caliente de las capas inferiores, al que desplaza en el nivel más bajo a que se encuentra el espectador, absorbiendo de ese modo el calor y humedad desprendidos por el organismo de aquél y tomando la temperatura necesaria para obtener condiciones saludables, así como un conveniente grado de humedad. De ese modo, este aire no se encuentra contaminado de polvo o suciedad, y es finalmente succionado por aberturas de exhaustación, localizadas al nivel del suelo.

Para evitar los peligros de resfriados en los espectadores, el enfriamiento del local se efectúa en los dos o más pisos del local, según se muestra en la figura 381, y para que tal enfriamiento sea regular, se mezcla en una cámara preliminar el aire seco y frío del exterior con una parte del aire extraído del local; la mezcla se envía al local sólo a 4 ó 5° C por debajo de la temperatura en el interior, de tal modo que durante su descenso por gravedad, el calor desprendido por los espectadores absorba esa diferencia de temperatura y alcance al nivel del público la temperatura ideal requerida.

En el cómputo del calor desarrollado en la sala hay que tener en cuenta, además, otros factores que son especiales para cada local considerado; nos referimos a las condiciones constructivas y de orientación de la sala, y al calor desarrollado dentro de la misma por radiación calorífica del alumbrado de la misma, así como a los huecos tales como ventanas, puertas, etc., cubiertas o cerradas con vidrios, sencillos o dobles, y por último pequeños o grandes motores eléctricos, conducciones de gas, etc.

Para el caso de cinemas y teatros, el término dependiente del alumbrado eléctrico tiene una importancia muy pequeña, puesto que, como es bien sabido, sólo permanece activo en los momentos de entrada y salida de público y durante el descanso intercalado normalmente en la mitad de cada sesión y por un tiempo, este último, que raramente excede de los 8 a 10 minutos: en el caso de estu-

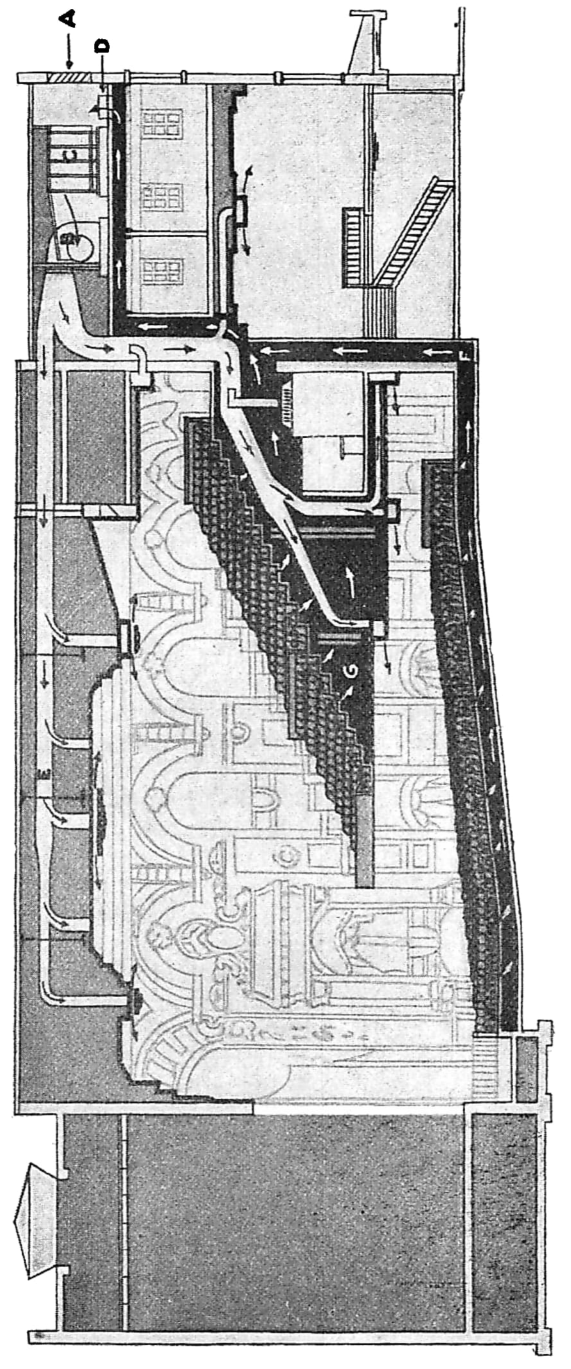


Fig. 381. Diagrama de ventilación de un cinema

A. Entrada de aire del exterior.
B. Ventilador.
C. Equipo de aclimatación.
D. Entrada de aire recirculado.
E. Conducto principal del suministro de aire acondicionado.
F. Conducto de aire de retorno.
G. Espacio bajo el anfiteatro para retorno del aire.

dios de radiodifusión, salas de fiestas, restaurantes, etc., este factor es muy importante, ya que el alumbrado permanece activo durante todo el tiempo que dure el trabajo, y la generación de calor por esta causa es relativamente grande, dependiendo del número de vatios eléctricos consumidos y teniendo en cuenta que normalmente tales locales suelen estar fuertemente iluminados, y que cada vatio consumido en energía eléctrica de alumbrado supone un desarrollo de 3,4 BTU = 0,85 kcal/s. El número de vatios consumidos depende del número de lúmenes que se desee obtener sobre el área iluminada, muy variable por cierto. La Westinghouse da unas estadísticas sobre estos valores en la forma siguiente: en fábricas y talleres varía entre 10 lúmenes por metro cuadrado (¡lamentablemente bajo y en perjuicio del rendimiento en el trabajo, por una mal entendida economía de los directores de empresa!) y 100 lúmenes, aun cuando el valor más recomendable en tales locales sea de 350 a 400 lúmenes; para una vivienda con luz del día, unos 1000 lúmenes, alcanzando en una calle de ciudad de ancho medio a la sombra unos 10 000, y a campo abierto, en un día de sol, unos 100 000 lúmenes por metro cuadrado. Para los cinemas, en la zona de Galicia, según las medidas efectuadas en nuestros locales, esa cifra alcanza a unos 7000 lúmenes por término medio [1].

Una característica esencial de los sistemas de acondicionamiento que es primordial en cines, teatros y estudios de radiodifusión, es la atenuación en el mayor grado posible del sonido o ruido inherente a su funcionamiento, su transmisión dentro de la sala por los conductos de ventilación o a través de las paredes, así como el producido por rozamiento del aire en sus conducciones; en general, tal ruido no debe exceder de 3 dB, y en cuanto a este último se logra cortando secciones elásticas en los tubos conductores de aire, y reduciendo cuanto es posible la velocidad del aire dentro del tubo.

Con respecto a las condiciones constructivas del local, interesa especialmente evaluar para tenerlo en cuenta en la capacidad calorífica del equipo de acondicionamiento, las pérdidas o ganancias por conducción de calor a través de paredes y techo de la sala, y para ello se necesita conocer los materiales empleados en la construcción del local, así como el espesor de los muros, materiales acústicos y decorativos de la sala, tipo de techumbre, localización de la sala dentro del edificio, edificaciones contiguas, y por último, orientación del local para conocer del modo más preciso posible, no sólo las horas y paredes sometidas a insolación, sino el calor que por esta causa puede generarse

[1] Como el número de lúmenes lanzados sobre la superficie de los espectadores depende del envejecimiento y limpieza de las lámparas, es más práctico tomar vatios por metro cuadrado del área del local; una media de 18 W por metro cuadrado es suficientemente buena en la práctica. Sobre un nuevo tipo de iluminación que puede modificar este coeficiente véase: J. BALTA, *Fundamentos y aplicaciones del alumbrado por fluorescencia*, «Anales de Física y Química», 1945, páginas 111-142.

en la referida sala. Todos estos elementos contribuyen cada uno con un término de pérdida o ganancia de calor, que se traduce en una determinada capacidad calorífica del equipo que conviene no olvidar, y así nada de extraño tiene que las casas proveedoras de tales sistemas sometan previamente al empresario, para poder hacer el proyecto de la instalación y confeccionar el presupuesto, un cuestionario en el que figuran no sólo las condiciones de temperatura y humedad del

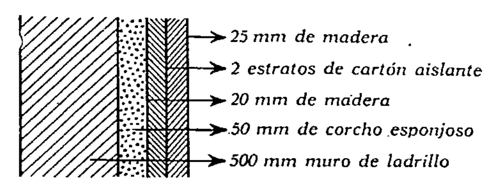


FIG. 382

medio exterior y las que se desean obtener en el interior de la sala, sino todos los datos que anteriormente se citan, así como los planos del local y lugar donde se debe situar el equipo en cuestión; así proceden, por ejemplo, la Carrier, que ha acondicionado los estudios de la B. B. C., de Londres y de la N. B. C. en la Radio City, así como el Rockefeller Center y los de la Columbia Broadcasting, de Nueva York, y otras casas como Carbondale, Trane, etc., someten cuestionarios análogos; la contestación a estos cuestionarios es decisiva en cuanto al precio y funcionamiento del equipo.

Transmisión del calor a través de las paredes. El paso del calor a través de las paredes de la sala depende: *a)* del tiempo durante el cual se consideren estas pérdidas o ganancias de calor; *b)* de la superficie de dichas paredes; *c)* del espesor de las mismas y material acústico o decorativo que las recubre interiormente, el cual casi siempre es un aislante térmico, y *d)* de la diferencia de temperatura entre el aire exterior y el interior de la sala; puede expresarse en la forma:

$$Q = S \cdot T \cdot K\,(t_1 - t_2),$$

donde Q está dado en calorías, S es el área de la pared en metros cuadrados, T es el tiempo expresado en horas, t_1 y t_2 son las temperaturas en °C del aire exterior y de la sala, y K un coeficiente de conductibilidad calorífica del material empleado en la pared, supuesta ésta homogénea (en caso contrario, habría para cada espesor homogéneo una expresión semejante). Este coeficiente de conductibilidad se expresa en calorías-hora, por metro cuadrado de superficie, por metro de espesor, y por cada grado centígrado de temperatura diferencial. A continuación damos el valor de K para algunos de los materiales aislantes más corrientes:

Material	K	Peso en kilogramos por metro cúbico
Amianto	0,13 a 0,19	576
Pizarra de amianto	0,19	1783
Asfalto	0,56 a 0,64	2120
Basalto	1,1 a 2,4	3000
Algodón en rama	0,04 a 0,054	81
Conglomerado	0,65 a 0,74	2100
Aire estancado	0,02	—
Aire libre	0,26	—
Pómez calcinada	0,06 a 0,09	390
Conglomerado de pómez	0,2	6 a 800
Carbón vegetal	0,05 a 0,056	200
Encina	0,18 a 0,31	820
Lignito	0,3 a 0,45	1200
Vidrio	0,47 a 0,75	2500
Fieltro	0,07 a 0,3	136
Piedra caliza	0,57 a 0,87	1660 a 1980
Tilo	0,13 a 0,3	550
Arena silícea	0,05 a 0,06	350
Polvo de cok	0,16	600
Corcho granulado	0,03 a 0,041	161
» asfaltado	0,045	165
» natural	0,14 a 0,26	160
» laminado especial	0,445 a 0,07	200
Lino en tela	0,045	—
Linoleum	0,16	1183
Mármol	1,1 a 2,9	2600
Papel-madera	0,038	—
Cascarilla de arroz	0,086	200
Arena	0,27 a 0,426	1500
Residuos de maceración	0,05 a 0,06	215
Lana de oveja	0,033 a 0,042	136
Pizarra de tejado	1,1 a 2,7	2700
Seda	0,038 a 0,045	140
Ladrillo	0,45 a 0,69	1850
Turba seca (en polvo)	0,045 a 0,052	190
» en polvo húmeda	0,07	220 a 280
Pelo de vaca	0,06	—

En general, el coeficiente K está dado por

$$K = \frac{1}{\dfrac{1}{a_1} + \dfrac{1}{a_2} + \Sigma \dfrac{d_i}{k_i}}$$

donde a_1 y a_2 son los coeficientes de radiación del aire exterior e interior, d_i es el espesor en metros de cada estrato de una pared heterogénea, y k_i es la conductibilidad calorífica de cada material que forme aquellos estratos, expresada en Cal/m²/h/°C.

a_1 y a_2 valen aproximadamente 25 y 8, según se trate de pared exterior o expuesta al viento, o para paredes interiores.

Ejemplo, para una pared como la constituída en la figura 382:

$$K = \frac{1}{\dfrac{1}{8} + \dfrac{1}{25} + \dfrac{0{,}5}{0{,}5} + \dfrac{0{,}05}{0{,}035} + \dfrac{0{,}045}{0{,}2} + \dfrac{0{,}001}{0{,}038}} = 0{,}36$$

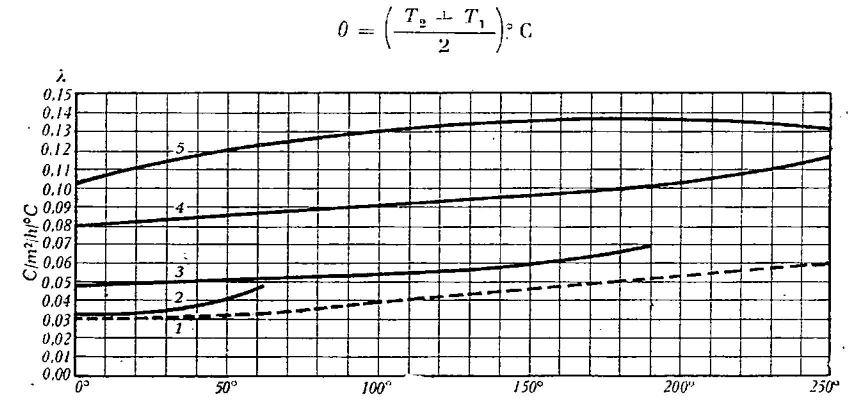
y la pérdida por metro cuadrado entre 5° y 25° en veinticuatro horas será:

$$Q = 100 \times 24\,(25° - 5°) \times 0{,}36 = 17\,400 \text{ calorías grandes.}$$

La tabla y gráfico que damos a continuación muestra la comparación del coeficiente de conductibilidad de la *lana de vidrio* Vitrofib, material aislante acústico, muy empleado en nuestro país en los cines y teatros, con respecto a otros también en uso, y que nos ha sido amablemente facilitado por la casa distribuidora.

Variaciones del coeficiente de conductibilidad k de algunos aislantes en función de la temperatura media θ

$$\theta = \left(\frac{T_2 + T_1}{2}\right)° \text{ C}$$



1. Vitrofib. 2. Corcho. 3. Magnesia. 4. Kieselguhr (1). 5. Amianto

(1) Material compuesto de arena de diatomeas.

Pesos de diversos materiales aislantes y espesores para una eficacia dada del aislamiento

Temperatura interna: 200° C. Recuperación exigida: 90 %.
Temperatura exterior: 20° C. Pérdida máxima admisible: 1,7 c/m²/h/°C

Aislante	Pérdida sin aislamiento	Pérdida con aislamiento	Espesor del aislante	Peso por metro cuadrado
Vitrofib	17	1,7	26 m/m	4,400 kg
Magnesia	17	1,7	36 »	7,560 »
Kieselguhr	17	1,7	54 »	23,200 »
Amianto	17	1,7	70 »	38,500 »

Estado higrométrico del aire (1). Siendo éste el medio de que nos vamos a valer para modificar las condiciones de temperatura y humedad del ambiente de la sala o local en estudio, es natural que demos unas ideas de sus características termodinámicas y físicas con el fin de que podamos sacar partido de las mismas para el diseño de los sistemas de acondicionamiento, y para ello, en primer lugar, vamos a ocuparnos de su humedad relativa o *estado higrométrico*. Como es sabido, desde la física elemental se llama *humedad relativa* del aire el peso en gramos de vapor de agua contenido en cada metro cúbico de aire, comparado con el que tendría si el mismo aire y a esa misma temperatura se encontrase saturado de vapor de agua, mientras que la humedad absoluta es aquel peso de vapor de agua sin comparación relativa al estado de saturación. Es la humedad relativa la que tiene importancia en los sistemas de acondicionamiento, puesto que un aire cuya humedad absoluta es 6, nos puede parecer muy seco o muy húmedo, según que su temperatura sea de 20°C o de 5°C.

En los libros elementales de física se demuestra fácilmente que si llamamos p_v a la tensión del vapor de agua a la temperatura t°C, $\alpha = \frac{1}{273}$, el coeficiente de dilatación de los gases y $\delta = 0{,}622$ a la densidad del vapor de agua y siendo 1,293 gr el peso *normal* de un litro de aire, se tiene como expresión de la masa m en gramos por metro cúbico de vapor de agua, la cantidad

$$m = 1{,}293 \times 10^3 \times 0{,}622 \frac{p_v}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t}$$

esta expresión nos enseña que para una temperatura determinada, la masa de vapor de agua es proporcional a la presión parcial p_v del vapor; de consiguiente, la humedad relativa será también la relación

(1) Quien desee profundizar más en este asunto puede consultar la magnífica obra, única en su género, de nuestro querido amigo Dr. F. MORÁN, *Termodinámica de la atmósfera*, Madrid, 1944.

entre la presión p_v del vapor de agua en la atmósfera, y la presión de saturación p_s a la misma temperatura; esto es:

$$H_r = \frac{p_v}{p_s} = \frac{m}{m_{\text{máx}}}$$

en que $m_{\text{máx}}$ es la masa de vapor de agua en el estado de saturación y para la misma temperatura. Para determinar el valor de p_s, nos valdremos de las tablas de vapor de agua que damos a continuación, tomadas de la *Termodinámica y constitución de la materia*, de Palacios.

Tabla de vapor de agua saturante

Temp, t_s °C	Presión P_v kg/cm²	Volumen específico del líquido litros/kg	Volumen específico del vapor v'' m³/kg	Entalpia del líquido w' kcal/kg	Calor de vaporización kcal/kg	Entalpia del vapor kcal/kg	Trabajo exterior kcal/kg	Calor latente interno kcal/kg
0	0,00622	1,0001	206,5	0,00	594,8	594,8	30,4	564,4
5	0,00889	1,0000	147,1	5,03	592,2	597,2	30,6	561,6
10	0,01252	1,0003	106,4	10,05	589,5	599,5	31,3	558,2
15	0,0174	1,0009	77,95	15,05	586,9	601,9	31,8	555,1
20	0,0238	1,0018	57,81	20,05	584,3	604,3	32,3	552,0
25	0,0323	1,0029	43,38	25,04	581,7	606,7	32,8	548,9
30	0,0433	1,0043	32,93	30,03	579,2	609,2	33,4	545,8
35	0,0573	1,0060	25,24	35,0	576,6	611,6	33,9	542,7
40	0,0752	1,0078	19,54	39,9	574,0	613,9	34,4	539,6
45	0,0977	1,0098	15,28	44,9	571,3	616,2	34,9	536,4
50	0,1258	1,0121	12,02	49,9	568,5	618,4	35,4	533,1
55	0,1602	1,0145	8,581	54,9	565,7	620,6	36,0	529,7
60	0,2028	1,0167	7,677	59,9	562,9	622,8	36,5	526,4
65	0,2547	1,0198	6,200	64,9	560,0	624,9	37,0	523,0
70	0,3175	1,0227	5,046	64,9	557,1	627,0	37,5	519,6
75	0,3929	1,0258	4,123	74,9	554,1	629,0	38,1	516,0
80	0,4827	1,0290	3,406	79,9	551,1	631,0	38,6	512,5
85	0,5893	1,0324	2,835	84,9	548,0	632,9	39,1	508,9
90	0,7148	1,0359	2,370	89,9	545,0	634,9	39,6	505,4
95	0,8619	1,0896	1,988	95,0	541,9	636,9	40,2	501,7
100	1,0333	1,0433	1,674	100,0	538,7	638,7	40,7	498,0

La primera columna da la temperatura en grados centígrados, la segunda la presión en kg/cm (1 kg/cm² = 0,969 atm). En la tercera están los volúmenes específicos del vapor en m³/kg. La quinta contiene la entalpia del líquido, tomando como origen 0° C y calculada a partir de la fórmula

$$w' = \int_0^t c_p' dt.$$

En la sexta columna se halla el calor de vaporización l_e en cal/gr. La séptima nos da la entalpia del vapor mediante la fórmula

$$w'' = w' + l_e.$$

En la octava se halla el trabajo exterior en kcal/kg realizado durante la vaporización, y que por kilogramo de vapor vale:

$$L = p\,(v'' - v') \simeq p\,v'' \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times \text{m}^3 = p\,v'' \cdot 10^4 \text{ kgm} = \frac{p\,v''\,10^4}{427} \text{ kcal}$$

Finalmente, en la última columna se da el llamado calor latente interno de vaporización ϱ, que es la diferencia entre las energías internas del líquido y del vapor y se calcula mediante la expresión

$$\varrho = u'' - u' = w'' - w' - p\,(v'' - v') = l_e - L$$

en virtud de la definición de entalpia. Más adelante veremos la utilidad de estas tablas.

Se llama *punto de rocío* la temperatura para la cual el vapor de agua con una tensión determinada p_v (la tensión a que existe en el aire a la temperatura real de éste) se encuentra saturado, y recibe este nombre como derivado del rocío que aparece en un higrómetro que permite tal determinación. Conociendo, pues, la temperatura del ambiente y el punto de rocío, se puede determinar fácilmente la humedad relativa en tanto por ciento; así, por ejemplo, si la temperatura ambiente es 25° y el punto de rocío es 10°, mediante la tabla anterior encontramos:

$$\text{Humedad relativa} = \frac{0{,}01252}{0{,}0323} = 0{,}38 = 38\ \%.$$

El higrómetro de condensación es demasiado complicado para ser manejado en las condiciones normales de servicio en los teatros, y por esta razón se recurre al *psicrómetro*, formado por dos termómetros iguales, uno de los cuales lleva el depósito forrado con una muselina humedecida constantemente mediante una vasija con agua, y el otro lo tiene libre en el aire; la evaporación del agua en la muselina, especialmente si el aire está en movimiento, enfría el depósito correspondiente, tanto más cuanto más rápida sea aquélla, haciendo descender su temperatura; la tensión del vapor de agua en el aire se determina mediante una fórmula, o mejor aún, mediante la carta psicrométrica de la figura 383, esta carta tiene a veces las temperaturas en grados Farenheit, pero se pasa fácilmente a la temperatura centígrada si se tiene en cuenta que entre ambas existe la relación

$$(°\text{F} - 32) = \frac{9}{5}\ °\text{C, con lo que } 1°\ \text{F} = 0{,}555\ °\text{C}$$

Mediante este sencillo instrumento, fácil de manejar por el personal de la empresa, aun cuando no se encuentre especialmente adiestrado, y la carta anterior, se puede determinar fácilmente las condiciones de temperatura y humedad, tanto del ambiente exterior al local como las que se consideren más apropiadas de mantener en la sala misma, a fin de hacerlas figurar en el cuestionario antes citado.

Entalpia (¹). En la técnica del acondicionamiento de locales se considera que el estado del aire queda determinado por tres variables: presión, temperatura y estado higrométrico; en lugar de esta última

(¹) Este nombre ha sido propuesto por Kammerlingh Onnes, pero se conoce entre los anglosajones con el de calor total *(total heat)*, y entre los alemanes como contenido en calor *(wärmeinhalt)*.

magnitud puede utilizarse la temperatura del termómetro húmedo T_h y el punto de rocío P_r, según acabamos de ver, siendo la temperatura propiamente dicha la que marca el termómetro seco T_s; se supone, además, que la presión permanece sensiblemente constante e igual a la presión atmosférica en el lugar de referencia.

En Termodinámica, se llama *entalpia*, calor total, o contenido de calor de un cuerpo, a la expresión

$$h = u + Apv$$

por unidad de masa del mismo, y en la que A representa el número de kilocalorías a que es equivalente un trabajo de un kilográmetro, esto es, 1/427; p es la presión a que se halla sometido ese cuerpo, y v el volumen que ocupa bajo aquella presión ([1]).

Se demuestra también, en dicha ciencia, que en una corriente flúida permanente, cuando no hay cambios de nivel ni de energía cinética, la cantidad de calor que se comunica a la unidad de masa se invierte exclusivamente en aumentar la entalpia específica (o referida a la unidad de masa), de tal forma que si llamamos 1 y 2 a los estados inicial y final ([2]):

$$q = h_2 - h_1$$

La entalpia del aire húmedo, esto es, de una mezcla de aire seco y vapor de agua, en virtud de las leyes de Dalton y de Joule, es la suma de las entalpias de ambos tomados cada uno a la temperatura de la mezcla y con su presión parcial. Si m_a y m_v son las masas de aire y de vapor respectivamente, contenidas en un volumen determinado de aire húmedo, la entalpia total será

$$H = m_a h_a + m_v h_v,$$

de donde resulta que la entalpia específica del aire húmedo, referida a la unidad de masa de aire seco, será:

$$h = \frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} \cdot h_v,$$

donde h_a es la entalpia específica del aire seco, y h_v la del vapor de agua. El aire seco puede considerarse como un gas perfecto, y tomando

---

([1]) La magnitud u recibe el nombre de *energía interna* del cuerpo, y se demuestra (véase PALACIOS, *Termodinámica*) que

$$du = EdQ - d\mathfrak{T}$$

en donde $E = 1/A$ es el equivalente mecánico del calor, dQ es la cantidad de calor tomado o cedido durante una transformación, dependiente de todos los estados intermedios porque ha pasado el cuerpo, y $d\mathfrak{T}$ la diferencia del trabajo efectuado durante la transformación. Tanto $\mathfrak{T}$ como u son diferenciales exactas, es decir, que dependen sólo de los estados inicial y final del cuerpo, pero no de los intermedios, cosa que no sucede con Q, quien depende del camino recorrido para llevar el cuerpo del estado inicial al final.

([2]) Es consecuencia de la ecuación anterior ya que ahora $d\mathfrak{T} = o$.

como origen de entalpias la del estado definido por la temperatura de 0° F y una presión cualquiera, ya que la entalpia sólo es función de la temperatura, resulta:

$$h_a = c_p\, T_s = 0{,}24\, T_s; \quad BTU/lb.$$

(Expresión semejante, con el mismo factor numérico de T_s, se obtiene midiendo las temperaturas en grados C, con la única diferencia que entonces resulta la entalpia expresada en kcal, kg; $h_a = 4{,}27 + 0{,}24\, T_s$ kcal/kg).

La entalpia específica del vapor de agua, mientras la presión sea suficientemente pequeña, depende solamente de la temperatura y, en consecuencia, es la misma que si se tratara de vapor saturado a la temperatura T_s. Por tanto, si se atribuye el valor cero a la entalpia del agua a 0° F, la entalpia del vapor a una temperatura T_s se compondrá del calor $c_p'T$ necesario para llevar el agua a la temperatura T_s y del calor latente de vaporización, que es función de la temperatura y se encuentra tabulado (véase la *Termodinámica*, de Palacios, edición 1943, tabla anterior):

$$h_v = c'_p\, T_s + l_e \quad ; \quad c'_p = 1; \quad BTU/lb.$$

El calor específico $c_p' = 1$ por definición, y, en el intervalo que nos interesa, puede ponerse con suficiente aproximación:

$$l_e = 1061 - 0{,}54\, T_s; \quad BTU/lb = 580 - 0{,}54\, T_s \text{ kcal/kg},$$

con lo cual resulta:

$$h_v = 1061 + 0{,}46\, T_s; \quad BTU/lb,$$

o bien, teniendo en cuenta la relación entre temperaturas en grados F y centígrada, que dimos antes, y que 1 $BTU/lb = 0{,}556$ kcal/kg,

$$h_v = 595 + 0{,}46\, T_s \text{ kcal/kg}.$$

Finalmente, nos queda por determinar el valor de m_v/m_a; para ello tengamos en cuenta que según las leyes de los gases perfectos:

$$p \cdot v = \frac{m}{M} R\, T,$$

donde p es la presión, m la masa que se considera del gas, M su masa molecular, R la constante de dichos gasesy T la temperatura Kelvin; despejando de aquí el valor de m, y aplicándola separadamente al aire y vapor de agua que ocupan el mismo volumen y están a la misma temperatura del termómetro seco, se tiene:

$$m_a = \frac{M_{\text{aire}}\, p_a \cdot v}{R T_s} \quad ; \quad m_v = \frac{M_{H_2O}\, p_v \cdot v}{R T_s}$$

de donde:

$$H_a = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_{H_2O}}{M_{\text{aire}}} \cdot \frac{p_v}{p_a} = \frac{M_{H_2O}}{M_{\text{aire}}} \cdot \frac{p_s}{p_a} \cdot \frac{p_v}{p_s} =$$

$$= \frac{M_{H_2O}}{M_{\text{aire}}} \cdot \frac{p_s}{p_a} H_r = 0{,}621 \frac{p_s}{p_a} H_r$$

en ella:

M_{H_2O} = masa molecular del agua = 18.
M_{aire} = masa molecular ficticia del aire $= 0{,}79 \times 28 + 0{,}21 \times 32 = 29$
p_s = presión de saturación a la temperatura T_s; se encuentra en la tabla de la página 588.
p_a $= p - p_s H_r$ es la presión parcial del aire.
H_r = estado higrométrico o humedad relativa $= p_v/p_s$.

Con ello, la entalpia específica del aire húmedo puede ponerse en la forma:

$$h = 0{,}24\, T_s + \frac{m_v}{m_a} (595 + 0{,}46\, T_s) \text{ kcal/kg,} \qquad (a)$$

y, por consiguiente, su calor específico a presión constante valdrá

$$c''_p = 0{,}24 + \frac{m_v}{m_a} \times 0{,}45 \text{ kcal/kg.}$$

El valor de h puede determinarse de aquella fórmula a partir del conocimiento de los valores de T_s y de T_h, que permiten determinar H_r y, por consiguiente, m_v/m_a, y para ello pueden construirse unas tablas, pero es mejor y más práctico aún utilizar al *Diagrama de Mollier* $h - m_v/m_a$. Por medio de este diagrama (fig. 383) pueden hallarse fácilmente las variaciones del estado del aire al variar las condiciones de temperatura y humedad. Las líneas casi horizontales son las de temperaturas constantes T_s; las líneas inclinadas, las de entalpia h constante, y las verticales, las de humedad absoluta m_v/m_a, igualmente constante. Para una determinada presión atmosférica (que en la figura se ha tomado igual a 760 mm de columna mercurial = 29,921 pulgadas de columna mercurial), se pueden trazar las curvas de igual humedad relativa H_r; la $H_r = 1$ representa la curva de saturación.

Las ordenadas de la recta inclinada, de la parte inferior del diagrama, dan para cada valor de H_a, o humedad absoluta $= m_v/m_a$, el valor correspondiente de la tensión del vapor p_v en milímetros de mercurio.

La deducción de la entalpia o calor correspondiente, para H_a = constante, se obtiene en el punto de encuentro de la ordenada de H_a con la curva de saturación $H_r = 1$ del *punto de rocío* P_r, por debajo del cual el vapor de agua se precipita. Para los enfriamientos por debajo del punto de rocío, h y H_a se hallan buscando el punto de intersección de la respectiva línea de temperatura con la curva de sa-

turación. Para que se vea la importancia de este diagrama, vamos a ilustrar su uso con algunos ejemplos.

a) Averiguar, para una temperatura del aire $Ts = 30°$, la proporción de vapor de agua H_a, la presión del vapor p_v, y la entalpia h para $H_r = 1$ y para $H_r = 0{,}7$ o el 70 %, así como el punto de rocío para esta última humedad relativa.

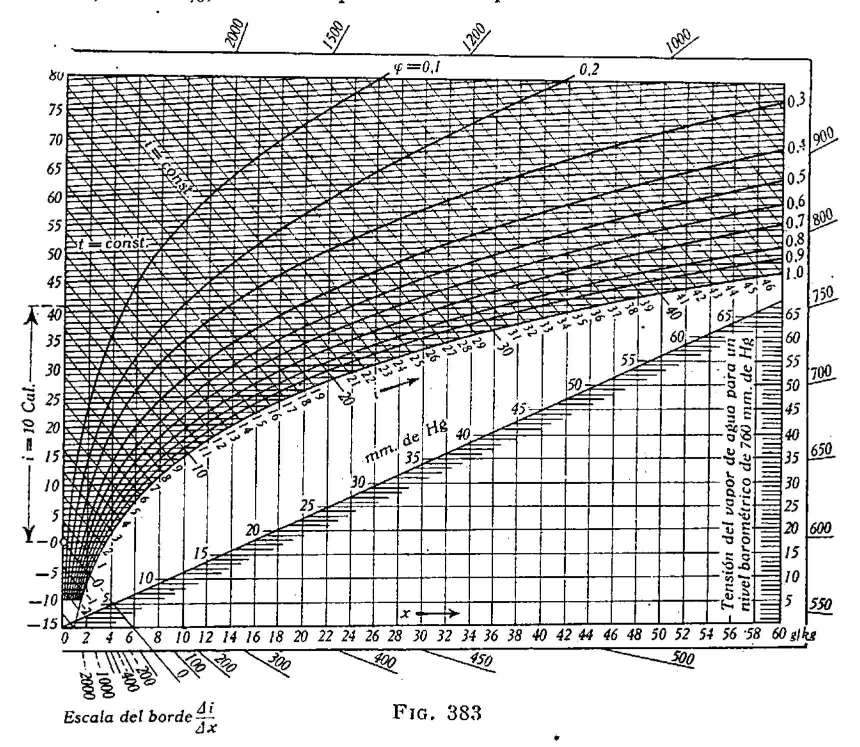


FIG. 383

La línea de temperatura para $T_s = 30°$, en el punto de encuentro con la línea de saturación, da $H_a = 27{,}2$ gr/kg, y en el de encuentro con la línea $H_r = 0{,}7$ da $H_a = 19{,}2$ gr/kg.

Verticalmente debajo de estos puntos se obtiene: $p_v = 32$ mm y $r_v = 23$ mm respectivamente. El punto de rocío $P_r = 17{,}5°$ se obtiene trazando una vertical desde el punto de encuentro de la línea $H_r = 0{,}7$ con la línea de temperatura hasta que encuentre a la línea de saturación. Por las intersecciones de esta línea de temperatura, con las curvas $H_r = 0{,}7$ y $H_r = 1$, pasan dos rectas de entalpia de valores $h_1 = 23{,}7$ kcal y $h_2 = 19$ kcal respectivamente.

b) A una cantidad de aire húmedo $m_a\,(1 + H_a)$, con $H_r = 0{,}7$ y $T_s = 0°$ C, debe elevársele la temperatura por medio de otra cantidad de aire $m_a'\,(1 + H_r')$, con $H_r' = 0{,}6$ y $T_s' = 20°$; siendo $m_a = 10\,000$ kg y $m_a' = 20\,000$ kg, determinar las constantes de la mezcla.

Del diagrama se deduce:

$$H_a = 2{,}8 \text{ gr/kg}; \quad h = 1{,}6 \text{ kcal}; \quad H_a' = 9 \text{ gr/kg}; \quad h' = 10{,}3 \text{ kcal}$$

Si ahora ponemos $m_a/m_a' = \lambda$, para la mezcla, se tendrá:

$$h + \lambda h' = (1 + \lambda)\, h_m; \qquad h_m = \frac{h + \lambda h'}{1 + \lambda}$$

y, por tanto, en virtud de una propiedad geométrica:

$$H_{a(m)} = \frac{H_a + \lambda H_a'}{1 + \lambda}$$

y después de sustituir los valores numéricos:

$$h_m = 7{,}7 \text{ kcal}; \qquad H_{a(m)} = 10{,}3 \text{ gr/kg};$$

el punto de estado (m) está en la recta de unión de los dos estados iniciales, y más cerca de la cantidad parcial mayor, dando para la temperatura $T_{s(m)} = 14°$ y $H_{r(m)} = 0{,}7$.

Si el punto de estado (m) hubiera quedado por debajo de la línea de saturación, la temperatura se hallaría por la isoterma que pasa por (m), cuya dirección sólo se desvía muy poco de la recta h = const.

c) Hay que enfriar 100 m³ de aire a 760 Torr. 30° y 75 % de humedad, hasta los 10°. Averiguar la cantidad de calor que hay que sustraer.

Si llamamos M a la masa de aire seco, se tiene $Q = M(h - h')$. Para determinar M, llamemos v_h y v_s a los volúmenes del aire húmedo y de ese mismo aire desprovisto de humedad a la misma temperatura, y v_n al volumen normal (es decir, a cero grado y 760 mm) de ese aire seco; si mantenemos constante la temperatura y es p la presión barométrica, se debe tener

$$v_s \cdot p = v_h \cdot (p - H_r \cdot p_s)$$

y además

$$v_s = v_n \cdot (1 + a\, T_s),$$

y si es $\delta_n = 1{,}29$ kg/m³ la densidad normal del aire seco, se tendrá

$$M = v_n\,\delta_n = \frac{v_s\,\delta_n}{1 + a\,t} = v_h\,\delta_n \left(1 - H_r \frac{p_s}{p}\right) \frac{1}{1 + a\,T_s} \qquad (\gamma)$$

y sustituyendo valores [1],

$$M = 100 \cdot 1{,}29 \left(1 - 0{,}75\,\frac{31{,}8}{760}\right) \frac{273}{273 + 30} = 112{,}1 \text{ kg.}$$

El punto de intersección de la línea de temperatura de 30° con $H_r = 0{,}75$ nos da $h = 19{,}8$ kcal, y el de intersección de la isoterma de 10° con la línea de saturación da $h' = 7$ kcal; luego:

$$Q = 112{,}1\,(19{,}8 - 7) = 1435 \text{ kcal.}$$

Máquina refrigerante. Como hemos de ver más adelante, todo sistema de acondicionamiento de aire necesita, en determinada época del año, enfriar éste y hacerle perder humedad, y para ello debe funcionar tal sistema en conexión con una máquina refrigerante, si la temperatura del agua de manantial, de distribución de la ciudad o de otro origen que pueda disponerse, no es lo suficientemente baja. Veamos, brevemente, cuál es el funcionamiento de tales máquinas.

Existe en la Termodinámica un axioma o principio fundamental según el cual el calor no puede pasar de un cuerpo frío a un cuerpo caliente sin gasto de energía, o, lo que es equivalente, el calor fluye siempre de un cuerpo caliente a un cuerpo frío, espontáneamente.

---

(1) El valor de $p_s = 31{,}8$ se obtiene del cuadro de la página 588, si la presión se expresa en mm de columna mercurial.

Este último fenómeno es un hecho experimental bien conocido: si dos cuerpos *se ponen en contacto* a diferentes temperaturas, el calor fluye del más caliente o a mayor temperatura, al más frío o que está a menor temperatura. Este flujo natural de calor puede, no obstante, invertirse interponiendo entre ambos cuerpos un determinado aparato que tome calor del cuerpo más frío, y mediante un gasto de energía, lo transfiera al cuerpo caliente; todo mecanismo que efectúe tal función se llama *máquina refrigerante*. La máquina refrigerante puede ser comparada con una bomba que toma calor a un bajo nivel del cuerpo frío y lo entrega, mediante un gasto de energía, a un más alto nivel de temperatura al cuerpo caliente y de un modo semejante a como una bomba ordinaria entrega el agua de un nivel bajo a otro más alto.

En el estudio de la Termodinámica se encuentran varias máquinas refrigerantes que utilizan procesos de naturaleza mecánica, física o química, pero como resultado de la experiencia acumulada durante largos años, se ha llegado a comprobar en nuestros días que el proceso más adecuado a fines comerciales es el de naturaleza mecánica, utilizando un ciclo continuo de evaporación, compresión y liquefacción. Los elementos esenciales de tal máquina refrigerante son: un compresor, un vaporizador y un condensador, además de una carga de un flúido adecuado, conocido como *refrigerante.*

La función de este refrigerante es transferir el calor desde una mezcla fría de agua y sal (salmuera) al agua caliente del condensador, de donde puede disiparse en la atmósfera; esta transferencia se efectúa haciendo uso del calor latente del refrigerante.

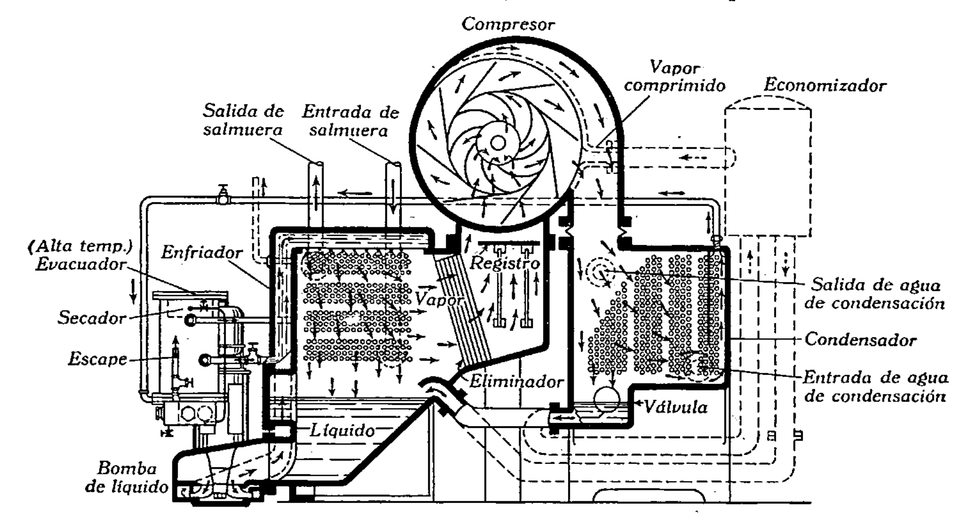
Todos los líquidos se vaporizan a una definida presión y temperatura, transformándose de líquido en vapor; esta transformación lleva consigo la absorción de energía en forma de calor, y para cada kilogramo del líquido transformado en vapor a temperatura constante, la cantidad de calor absorbido es también constante y se conoce con el nombre de *calor latente* de vaporización a esa determinada temperatura y presión.

Recíprocamente, cuando un vapor se condensa para transformarse en líquido, a una dada presión y temperatura, el calor de vaporización vuelve a ser entregado de nuevo. Cuando la presión es reducida, la temperatura a la que se realiza la vaporización también es reducida; en consecuencia, los líquidos pueden vaporizarse a muy bajas temperaturas, absorbiendo a esa temperatura el valor latente de vaporización. En este proceso de la Naturaleza, se basa el sistema mediante el cual el refrigerante transfiere calor en el curso de su ciclo a través de la máquina refrigerante.

En el vaporizador, un líquido adecuado se hace vapor a una baja temperatura, bajo la presión reducida creada por la succión del compresor. Al vaporizarse el refrigerante absorbe calor de la salmuera u otro medio que se encuentre en contacto con el exterior de los tubos, de los que el vaporizador está compuesto. La salmuera, agua o líquido utilizable es así enfriado a una temperatura próxima a aquella a la que el

refrigerante se vaporiza, y esta temperatura puede, si es necesario, ser inferior en algunos grados al punto de fusión del hielo.

El vapor procedente del cambio de estado del refrigerante es succionado por el compresor, el cual lo eleva a una más alta presión y temperatura. En estas condiciones, se descarga en el condensador, constituído también por una serie de tubos o bobinas huecas, por cuyo interior circula agua. El refrigerante a tan alta presión se con-



Salmuera y agua, dentro de los tubos; líquido y vapor refrigerante, fuera de los tubos

FIG. 384. Dispositivo esquemático

densa, entregando calor al agua circulante por los tubos del condensador, y aquél, en forma líquida, retorna al vaporizador, de donde vuelve a pasar a través del mismo ciclo.

De este modo, se ve bien que la máquina refrigerante actúa como una bomba que toma calor del flúido que debe enfriarse (salmuera o agua) y lo transfiere al líquido disipador, agua en este caso. Esta transferencia de calor se mantiene por el movimiento y cambio de estado del refrigerante, que sufre un ciclo continuo vaporizándose a baja temperatura en el vaporizador y condensándose para volver al estado líquido en el condensador a más alta temperatura, bajo el control de la presión creada por el compresor; todo sistema de compresión de vapor opera bajo este principio. La figura 384 muestra en corte una máquina de este tipo de la acreditada firma Carrier Engineering, de Londres, y la figura 385 muestra el compresor centrífugo empleado en este tipo de instalación, el cual presenta indudables ventajas respecto a los de pistón empleados en otros tipos de máquinas refrigerantes. Debemos, no obstante, indicar que la elección del tipo de compresor depende grandemente de las características del refrigerante; cuando éstas son tales que es necesario manejar solamente un

volumen relativamente pequeño de vapor para producir cada unidad de enfriamiento, como es el caso del freón, el tipo más adecuado de compresor es el de émbolo alternativo, debido a su conocida alta eficiencia comparada con la de los otros tipos. Cuando, por el contrario, igual enfriamiento requiere grandes volúmenes de vapor — como en el caso del cloruro de metilo — a comprimir a tensión inferior a la presión atmosférica, entonces se impone el tipo centrífugo.

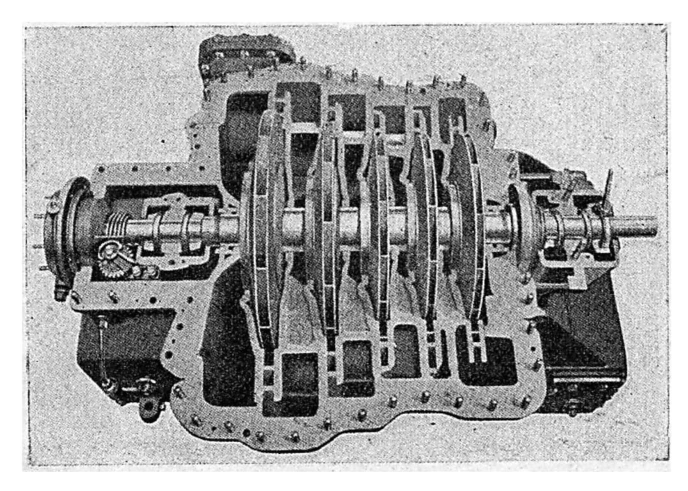


FIG. 385

El refrigerante empleado en tales tipos de máquinas suele ser amoníaco, cloruro de metilo y Freón, nombre comercial con que se conoce el dicloro-diflúor-metano, que es el refrigerante más extendido en la industria americana y que, además de no ser tóxico, ni inflamable o explosivo, no tiene olor ni produce irritación en las mucosas, cualidades todas ellas muy apreciables en los casos de fugas inopinadas. Desde el punto de vista de sus cualidades técnicas y mecánicas, presenta las ventajas de que las tensiones de condensación y evaporación son bajas y positivas, esto es, superiores a la presión atmosférica, lo que permite obtener una gran eficacia o rendimiento en el diseño del compresor. Por último, puede utilizarse con sistemas de condensación con agua o aire enfriados, debido a su baja presión de condensación y a su temperatura de compresión, excepcionalmente baja.

Ciclos de un sistema de acondicionamiento y factores de que depende. Con todas las consideraciones que hasta ahora llevamos hechas, podemos resumir así los ciclos que debe llenar un tal sistema; durante el invierno:

a) Calefacción con vapor o agua caliente.

b) Humidificación por medio de una cortina de agua pulverizada en forma muy dividida, que es recogida por el aire en forma de vapor.

c) Limpieza y purificación del aire mediante filtros viscosos o de lana de cobre, etc., que pueden ser reemplazables de tiempo en tiempo.

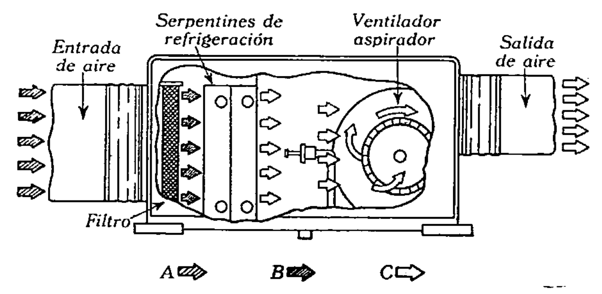


Fig. 386 *a*. En el ciclo de refrigeración de verano se utiliza agua fría, hielo o refrigeración mecánica.

A. Aire caliente, húmedo y sucio, entrante.
B. Aire limpiado por el filtro.
C. Aire enfriado y desecado por los serpentines. El aire limpio, frío y desecado se distribuye en la sala por el aspirador

d) Circulación del aire, mediante sopladores en jaula de ardilla de relativamente pequeña velocidad y paletas múltiples.

El ciclo de verano comprende:

a) Enfriamiento del aire con agua de distribución de la localidad,

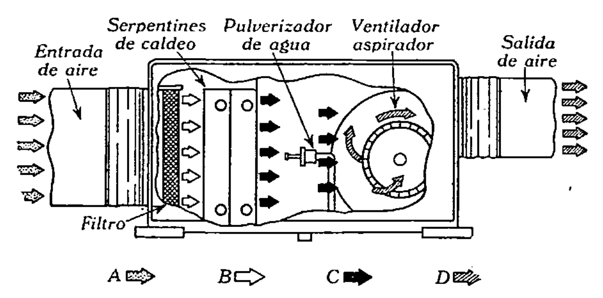


Fig. 386 *b*. En el ciclo de invierno se usa como generador de calor, vapor o agua caliente de una caldera.

A. Aire de la sala seco que entra en la unidad.
B. Aire limpiado por el filtro.
C. Aire calentado por los serpentines de calefacción.
D. Suficiente humedad añadida al aire por el pulverizador; el aire caliente, húmedo y limpio, se distribuye en la sala por el aspirador

agua de pozo, agua enfriada, salmuera o refrigerantes de expansión directa.

b) Desecación del aire por medio de serpentines de condensación de gran superficie.

c) y *d)* Idénticos a los del ciclo de invierno.

En la figura 386 se muestra en *a* en ciclo de verano, y en *b* en ciclo de invierno, y en ambos casos se ve que los serpentines a través de los que pasa el aire exterior mezclado con parte del interior recircu-

lado, deben trabajar en conexión con hervidores de agua o de vapor, y con máquinas refrigerantes del tipo anteriormente descrito, además

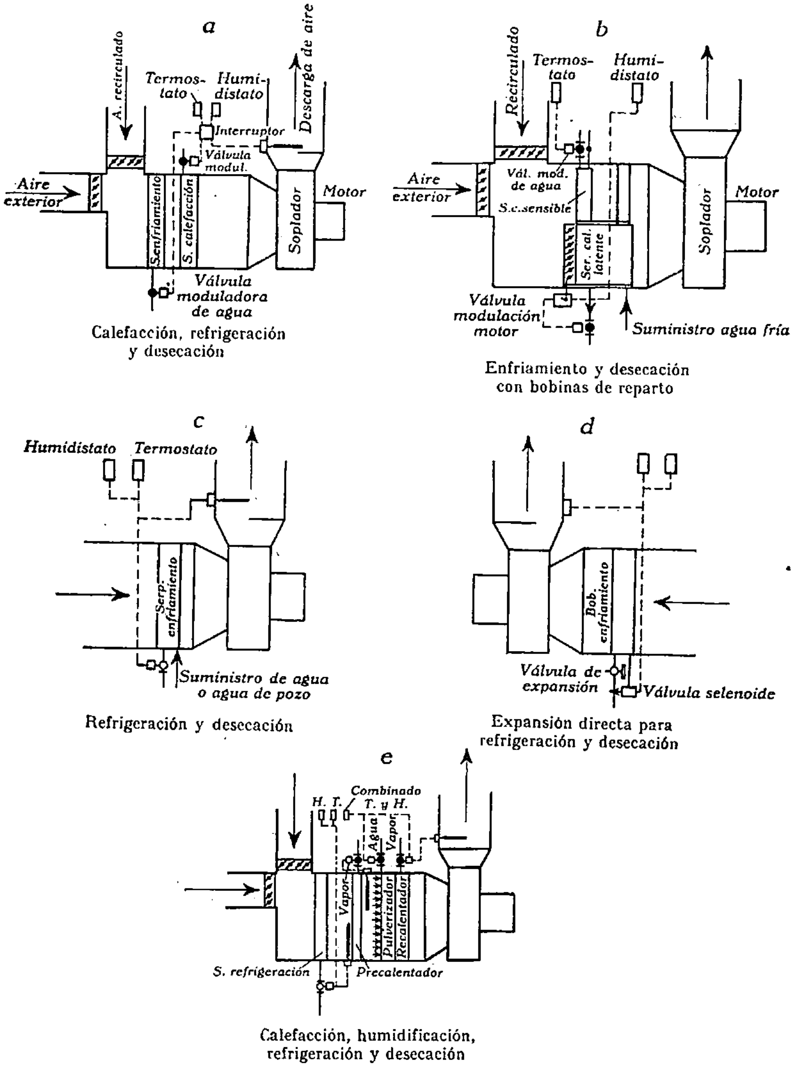


FIG. 387

de un sistema de control que varía mucho con las condiciones climatológicas especiales de cada país y con las exigencias del empresario en cada local. La figura 387 da, según estas condiciones, distintos tipos de sistemas de control adecuados a otras tantas necesidades. Cuando las condiciones de temperatura y humedad son muy rigurosas, el

sistema de *serpentines de reparto (Split coils)* que aparece en la figura 387 *b*, y esquemáticamente en la figura 388, es el más adecuado. Previamente al desarrollo de este sistema, ideado por la casa americana Trane, el único medio de lograr tales condiciones de control cuando la carga era variable, consistía en recalentar el aire mediante vapor o agua caliente, como se ve en la figura 387 *e*, con agentes secantes o desecadores especiales u otro sistema, que en general era caro. Esto lleva como consecuencia un incremento en la capacidad del equipo con el consiguiente aumento en los gastos, tanto desde el punto de vista del coste inicial, como en el de su funcionamiento. En el sistema de serpentines de reparto, la cantidad de aire que pasa a través de los serpentines de *condensación* o de *calor latente* destinados a desecar el aire, se controla con un humidistato, mientras que la que pasa a través de los del *calor sensible* o enfriamiento, se controla mediante la cantidad de refrigerante que pasa por el interior de dichos serpentines, mediante un termostato.

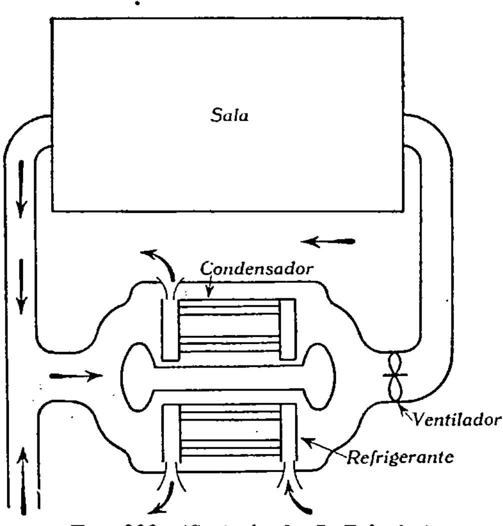


FIG. 388. (Cortesía de J. Palacios)
Control por serpentinas de reparto

La determinación de la capacidad de enfriamiento del equipo se calcula teniendo en cuenta cuatro factores:

a) Cantidad de aire que debe circular; ésta depende de la carga en calor sensible, esto es, depende sólo de la diferencia de temperatura del espacio de que se trate, con exclusión de la del aire exterior, de la temperatura y humedad que debe mantenerse y del volumen y forma del local a acondicionar.

b) Las temperaturas T_s y T_h de los termómetros seco y húmedo de un psicrómetro, correspondiente al aire mezclado que entra en la unidad; de esas temperaturas depende el aire que debe ser recirculado y la cantidad que debe tomarse del exterior.

c) De la carga calorífica total, que a su vez depende del calor sensible y del latente o de evaporación en la sala y de la cantidad de aire exterior introducido.

d) Del tipo y temperatura a que entra el refrigerante propiamente dicho. Para la mejor comprensión de la influencia de estos factores daremos un ejemplo del cálculo de la capacidad correspondiente a un local dado.

Ejemplo de determinación de las características de un equipo de acondicionamiento para un local dado. Supongamos que deseamos acondicionar una sala de cine capaz para 600 espectadores; según vimos al hacer el estudio acústico, el máximo volumen por espectador compatible con unas buenas condiciones de sonoridad en la sala, se fija en 150,3 = 4,2 m³: de consiguiente, le corresponderá a la sala un volumen de

$$V = 4{,}2 \times 600 = 2520 \text{ m}^3 = 90\,000 \text{ p c},$$

y teniendo en cuenta que entre las dimensiones debe existir la relación:

$$l = 2{,}5 \text{ h} \text{ y } a = 1{,}5 \text{ h}; \qquad h = \sqrt[3]{\frac{V}{3{,}75}} = \sqrt[3]{\frac{2520}{3{,}75}} \simeq 8{,}8 \text{ m}$$

obtenemos para estas dimensiones:

Altura = 9 m Longitud = 22 m Anchura = 13 m

a) La determinación del volumen de aire en circulación debe hacerse, en el caso de cines y teatros, sobre la base de la máxima capacidad de espectadores en la sala y teniendo en cuenta las dimensiones o cubicación del local. Worthington admite que cada espectador precisa un volumen de aire fresco de 0,56 m³ = 20 p c (pies cúbicos) por minuto, lo que representa más de siete veces la cantidad indispensable para la respiración y suficiente para producir una renovación de aire cada 15 minutos, bajo la hipótesis de que no se permite fumar; si tal no fuera el caso, se precisarían a lo menos 0,85 m³ = 30 p c por minuto con el fin de barrer el humo del ambiente. De momento vamos a admitir — lo que está dentro de lo corriente — una renovación de aire cada 5 minutos, con lo cual el número de metros cúbicos por minuto de aire en circulación será

$$\frac{2520}{5} = 504 \text{ m}^3/\text{min} = 18\,000 \text{ p c/min},$$

y si de este aire asignamos a cada espectador 0,227 m³ = 8 p c de aire puro por persona y minuto, tendremos que, de los 504 m³ de aire en circulación, 369,6 m³ por minuto serán de la sala recirculados, y 134,4 m³ por minuto serán de la atmósfera exterior, produciéndose una renovación en la sala cada 5 minutos.

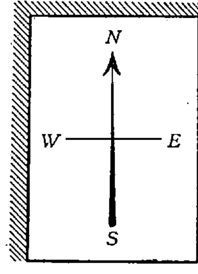


FIG. 389

b) Calor sensible y calor latente de los espectadores. Como según vimos cada persona radia unas 100 kcal/h, el total de los espectadores desarrollará unas

$$100\,600 = 60\,000 \text{ kcal/h} = 240\,000 \text{ Btu/h}.$$

Para determinar el calor latente, tengamos en cuenta, como dijimos antes, que cada persona emite unos 40 gr de vapor de agua por hora, lo que tomando para valor del calor latente del agua unas 540 kcal (DUBBEL) representa por persona y por hora 540 × 0,040 = 22 kcal/h, luego en total tendremos:

$$22\,600 = 13\,560 \text{ kcal/h de calor latente} = 54\,240 \text{ Btu/h}.$$

c) Calor sensible de la iluminación. Se calcula a razón de 3,4 Btu/h/W = = 0,85 kcal/h/W, y repartiendo estos últimos a razón de 18 W/m² = 1,75 W por p² del área de los espectadores, como ésta vale 286 m², deberá tenerse

$$286 \cdot 18 \cdot 0{,}85 = 4376 \text{ kcal/h};$$

pero teniendo en cuenta el tiempo escaso en que se realiza la actividad de este origen de calor, tomaremos solamente el 50 % de su valor, es decir:

$$Q_1 = \text{calor de iluminación} = 2188 \text{ kcal/h} = 8752 \text{ Btu/h}.$$

d) Conducción a través de las paredes. Supongamos una orientación determinada del edificio que contiene el local, y que, conforme se indica en el esquema adjunto (fig. 389), tiene dos paredes medianeras con otros edificios adyacentes; supongamos además que las paredes laterales están constituídas con piedra caliza de 20 cm de espesor, tratada en su interior con Celotex de 1,5 cm de espesor sobre un lecho de yeso, y apoyado en la caliza por medio de listones separadores de 0,8 cm de grueso; obtenemos así, mediante un cálculo semejante al indicado al hablar de esta clase de conducción de calor, un factor de conducción aproximado de valor $^1/_4$, con lo que, dadas las temperaturas exterior e interior que hemos fijado, se tendrá:

$$Q_2 = (22 + 13) \cdot 9 \cdot 1/4 \cdot (34{,}6 - 26{,}6) = 5864 \text{ kal/h} = 23\,456 \text{ Btu/h};$$

las paredes medianeras no ganan sensiblemente calor por ser medianeras. Otro tanto sucede con el suelo, y en cuanto al techo lo supondremos con cámara de aire, formado en su interior con un aislante soporte rígido de 1,5 cm de espesor, y 1,5 cm de yeso; podremos tomar así un factor de conducción de 0,30 cm, pero debido a la orientación horizontal del techo que facilita la condensación, podremos tomar su temperatura inferior en 5° C a la del aire exterior, se tendrá, pues:

$$Q_3 = 22 \times 13 \times 0{,}30 \times (29{,}6 - 26{,}6) = 248 \text{ kcal/h} = 993 \text{ Btu/h}.$$

e) Insolación. Si suponemos el edificio orientado tal como se ve en la figura 389, sólo las paredes Sur y Este estarán expuestas a la intemperie, y el efecto de insolación se ejercerá predominantemente sobre la cara Este; el factor de conducción será el mismo de antes, pero, en cambio, el efecto del Sol nos permite considerar un exceso en la temperatura exterior de unos 8° C, con lo que se tendrá:

$$Q_4 = 22 \cdot 9 \cdot 0{,}25 \cdot (42{,}6 - 26{,}6) = 792 \text{ kcal/h} = 3168 \text{ Btu/h}.$$

En resumen, el *calor sensible* a tomar en cuenta para la elección del equipo será, pues:

	$Q_0 =$	60 000	kcal/h	= 240 000	Btu/h.
	$Q_1 =$	2 188	»	= 8 752	»
	$Q_2 =$	5 864	»	= 23 456	»
	$Q_3 =$	248	»	= 993	»
	$Q_4 =$	792	»	= 3 168	»
Total	$Q_S =$	69 092	kcal/h	= 276 369	Btu/h.

y el *calor latente*, producido en la sala,

$$Q_l = 13\,600 \text{ kcal/h} = 54\,400 \text{ Btu/h}.$$

Tenemos, pues, los siguientes datos iniciales de la sala:

Condiciones exteriores: $T_s = 35{,}0°$ C = 95° F; $T_h = 25{,}5°$ C = 78° F;
$P_r = 22{,}2°$ C = 72° F; $H_r = 47$ %.
Condiciones interiores: $T_s = 26{,}6°$ C = 80° F; $T_h = 19{,}4°$ C = 67° F;
$P_r = 15{,}5°$ C = 60° F, $H_r = 50$ %.
Calor total sensible: $Q_S = 69\,200$ kcal/h = 276 800 Btu/h.
Calor latente: $Q_L = 13\,200$ kcal/h = 52 800 Btu/h.
Volumen de aire en circulación, 504 m³ = 18 000 p c
Volumen de aire exterior 134,4 » = 4 800 »
Volumen de aire recirculado 369,6 » = 13 200 »
} por minuto.

Como refrigerantes:

emplearemos: { Freón a 40° F = 4,4° C en el serp. de c. latente.
Agua a 65° F = 18,3° C en el serp. de c. sensible.

Características del condensador. Siguiendo las normas usuales, admitiremos que la velocidad del aire en los serpentines de condensación es de 500 p/min = = 1,5 m/min, y se considera satisfactorio el que, siendo 4,4° C la temperatura del refrigerante, el aire tenga a la salida un punto de rocío de $P_r = 9°$ C = 48°F; en condiciones satisfactorias podría lograrse que el punto de rocío del aire a la salida del condensador excediese a la temperatura del refrigerante en sólo 6° F = = 3,3° C en lugar de 4,4° C, como hemos admitido; pero si se quisiera lograr todavía una diferencia menor, habría necesidad de poner un gran número de filas de tubos serpentines, por lo que no es aconsejable. Como a la salida del condensador el estado higrométrico del aire suele ser $H_r = 90$ %, resultará que las condiciones del aire a la salida del condensador, deducibles de la carta (fig. 383), serán:

$$T_s = 10{,}5°\,C = 51°\,F; \quad T_h = 9{,}6°\,C = 49{,}2°\,F; \quad P_r = 9°\,C = 48°\,F; \quad H_2 = 90\,\%.$$

Estado de la mezcla de aire a la entrada de los serpentines. Se trata de averiguar la T_s y T_h de la mezcla que resulta de reunir el aire procedente de la sala con el que se toma del exterior. Como la mezcla se produce por vía adiabática, y se supone que no hay cambios de nivel ni de energía cinética, pueden establecerse dos condiciones: una, conservación de la entalpia total, y otra, conservación de la masa de vapor, ya que se supone que al efectuar la mezcla no hay condensación. En lugar de este método riguroso, puede seguirse un sistema más sencillo, que consiste en empezar por hallar la temperatura de la mezcla T_s, suponiendo que las dos corrientes de aire que se unen, sólo difieren en la temperatura, esto es, sin tomar en consideración su diferente estado higrométrico. No se toma en cuenta tampoco la diferencia de densidades, lo que permite operar con volúmenes en vez de emplear las masas, como sería lo correcto. Resulta, pues, que si x_2 m³ de aire a la temperatura de 35,0° C se mezclan con x_1 m³ de aire a la temperatura de 26,6° C, la temperatura T_s de la mezcla será

$$x_1\,26{,}6 + x_2\,35 = (x_1 + x_2)\,T_s,$$

de donde:

$$T_s = \frac{134{,}4 \times 35 + 369{,}6 \times 26{,}6}{504} = 28{,}8°\,C = 72{,}5°\,F.$$

Por otra parte, la conservación de la entalpia, admitiendo que pueden reemplazarse las masas por los volúmenes, por despreciar la diferente densidad de ambas corrientes, se expresa así:

$$x_1\,h_1 + x_2\,h_2 = (x_1 + x_2)\cdot h; \qquad (\beta)$$

los valores de h_1 y h_2 pueden determinarse de las tablas a que hemos aludido antes, o mediante el diagrama de Mollier, en función de T_s y T_h; esto último es lo más cómodo; pero cuando no se dispone de ninguna de ambas cosas, todavía es posible determinar esas entalpias específicas en función de ambas temperaturas de la siguiente manera:

Según hemos encontrado antes,

$$H_a = \frac{m_v}{m_a} = 0{,}621\,\frac{p_s}{p_a}\,H_r;$$

el valor de $p_s = 0{,}0573$ kg/cm² lo determinamos de las tablas de Regnault para $T_s = 35°$ C, y la $H_r = 0{,}47$ se deduce, como dijimos, a partir de T_s y P_r; con ese valor de H_r se determina $P_a = p - H_r p_s = 1{,}0333 - 0{,}47 \times 0{,}0573 = 1{,}0085$ kg/cm², con lo cual:

$$H_a = 0{,}621\,\frac{0{,}0573}{1{,}0085} = 0{,}0165,$$

y con este valor y $T_s = 35°$ C (para la entalpia del aire exterior h_2), se llevan a la ecuación (a) (pág. 592), y tendremos ([1]):

$$h_2 = 0{,}24 \times 35 + 0{,}0165\ (595 + 0{,}46 \times 35) = 18{,}3 \text{ kcal/kg};$$

de un modo análogo se calcula $h_1 = 31{,}15$ Btu/lb $= 13{,}02$ kcal/kg.

Una vez conocidos estos dos valores, el valor de h será según la ecuación (β):

$$h = \frac{18{,}3 \times 134{,}4 + 13{,}02 \times 369{,}6}{504} = 14{,}40 \text{ kcal/kg}.$$

En definitiva resulta que la mezcla tiene una temperatura $T_s = 28{,}8°$ C y una entalpia específica de 14,40 kcal/kg, y el problema que hemos de resolver ahora es determinar T_h, el cual es inverso del anterior. Mediante el diagrama de Mollier se encuentra fácilmente:

$$T_s = 28{,}8°\text{ C};\quad T_h = 19{,}9°\text{ C};\quad P_r = 17{,}0°\text{ C},$$

que son las condiciones de la mezcla de aire.

Estado del aire a la salida del serpentín condensador. Supóngase primero que por el condensador sólo circula el aire procedente de la sala. Se puede determinar mediante la expresión (γ) que dimos antes ([2]) el peso en kilogramos de aire que circula por hora, que es

$$M \times 60 = 504 \times 1{,}29 \left(1 - 0{,}50\,\frac{24{,}2}{760}\right) \frac{1}{1 + \frac{26{,}6}{273}} \times 60 = 13\,878 \text{ kg/h}.$$

Ahora bien, en cada hora circulan esos kilogramos y hay que rebajar su entalpia latente en 13 600 kcal, es decir, la cantidad de calor que debemos rebajar a cada kilogramo; o sea, el valor en que debe rebajarse la entalpia específica del aire que entra en el condensador es:

$$\frac{13\,600}{13\,878} = 0{,}98 \text{ kcal/kg},$$

y como para las condiciones de entrada de la mezcla, su entalpia específica vale, según hemos encontrado, 14,40, la entalpia latente a la salida del condensador será: $h = 14{,}4 - 0{,}98 = 13{,}42$ kcal/kg; a tal valor y manteniendo su temperatura $T_s = 28{,}8°$ C, le corresponde un $P_r = 13°$ C.

Se trata ahora de calcular la fracción de la mezcla que ha de pasar por el condensador, sabiendo que entra a $P_r = 17°$ C y que sale con $P_r = 9°$ C.

Se tiene: para $P_r = 17°$ C vale $h = 14{,}4$, para $P_r = 9°$ C vale $h = 6{,}4$, luego $h - h' = 8{,}0$, y, por consiguiente, es lo mismo hacer pasar los 504 m³/min, de modo que salgan a $P_r = 13°$ C, que hacer pasar sólo una cantidad m tal:

$$m \cdot 8{,}0 = 504\ (13 - 13{,}42),$$

de donde $m = 113$ m³, por consiguiente:

Por el condensador pasan 113 m³ de la mezcla, que salen a $P_r = 9°$ C.

Por el refrigerante pasan 391 m³ de la mezcla, que salen a 19° C.

La sección del condensador, para que pase el mencionado volumen de aire con velocidad no superior a la señalada anteriormente, deberá ser:

$$s = \frac{113}{1{,}5} = 75{,}3 \text{ m}^2 \simeq 80 \text{ m}^2.$$

Necesitamos ahora calcular la potencia frigorífica del condensador y la superficie de condensación.

([1]) Si se tiene en cuenta el sumando 4,3 kcal/kg de h_e, resultan 22,6 kcal/kg.

([2]) Página 594.

Potencia frigorífica del condensador. La entalpia total que ha de ser absorbida en el condensador, es decir, su capacidad frigorífica, se calcula como sigue:

Entalpia del aire mezclado a la entrada con T_h = 19,9° C es h = 14,40
Entalpia del aire mezclado a la salida con T_h = 9,6° C es h = 10,92

3,48 kcal.

La cantidad de aire que pasa es:

113 · ϱ · 60 kg/h, siendo ϱ = densidad = 1,19 kg/m³; es decir:
113 × 60 × 1,19 × 3,48 = 28 077 kcal/h
será esa capacidad frigorífica.

Superficie de condensación. El calor que pasa a través de una superficie vale, según vimos,

$$Q = k \cdot t \cdot s \cdot \Delta T,$$

donde ΔT es el exceso de temperatura, t el tiempo y k el coeficiente de transmisión, que para una superficie húmeda vale k = 1000 Btu/lb = 2,7 kcal/m² grado C y por hora.

Para calcular el exceso de temperatura, entre el aire y la corriente de refrigeración *(Freón)*, hemos de tener en cuenta que ambas corrientes van en sentidos opuestos, que además el Freón entra a 40° C y sale a 45° y que éste debe absorber la entalpia total del aire.

Se tiene, pues, para el exceso de temperatura:

	A la entrada	A la salida
T_s = del aire	28,8° C	10,5
T del Freón	7,9	4,4
	20,9	6,1

Exceso medio (20,9 + 6,1)/2 = 13,5° C = ΔT.

Representando ahora por a la relación entre la superficie de condensación y la sección s' = 80 m², que hemos determinado antes, se tendrá

$$a = \frac{Q}{k \cdot s' \cdot \Delta T \cdot t} = \frac{28\,077}{2,7 \times 13,5 \times 80} = 2,$$

luego emplearemos *dos* filas de tubos de 8 × 10.

Serpentín refrigerante. Tiene por objeto completar el descenso de temperatura, por no ser suficiente el conseguido en el condensador. Su misión consistirá, pues, en reducir la entalpia sensible del aire sin modificar la latente. Admitiremos que la corriente gaseosa circula por el refrigerante a la velocidad máxima de 6 metros por minuto.

Del condensador sale la mezcla de aire con T_s = 10,5°, y en la sala debe tener T_s = 26,6°; puede, pues, absorber

$$113 \cdot \varrho \cdot c_p \cdot (26,6 - 10,5) \cdot 60 \text{ kcal/h},$$

y como ϱ = 1,19 kg/m³, y c_p = 0,308 kcal/kg/° C, se tendrá:

$$\varrho \cdot c_p \cdot 60 = 1,19 \times 0,308 \times 60 = 22 \text{ kcal/kg/h/°C},$$

y la entalpia sensible que puede absorber el aire procedente del condensador valdrá

$$113 \times 22 \times (26,6 - 10,5) = 40\,025 \text{ kcal/h}.$$

Como la entalpia sensible que ha de sustraerse a la corriente gaseosa vale 69 200 kcal/h, la potencia frigorífica del refrigerante habrá de ser

$$69\,200 - 40\,025 = 29\,175 \text{ kcal/h}.$$

Por tanto, si los 391 m^3/min que circulan por el refrigerante procedieran de la sala, con una $T_s = 26{,}6°$, la temperatura T'_s a la salida del refrigerante estaría dada por

$$391 \times \varrho \times c_p \times 60\ (26{,}6 - T'_s) = 29\,175$$

de donde

$$T'_s = 26{,}6 - \frac{29\,175}{391 \times 22} = 26{,}6 - 3{,}4 = 23{,}2°\ \text{C}.$$

En realidad, la mezcla gaseosa no entra en el refrigerante con $T_s = 26{,}6$, sino con $T_s = 28{,}8°$, por lo que la potencia frigorífica del refrigerante ha de ser

$$391 \times 22 \times (28{,}8 - 23{,}2) = 48\,171\ \text{kcal/h}.$$

Según esto, la sección del refrigerante, tomando como base aquella velocidad que admitimos ya antes, será

$$\frac{391}{6} = 65\ \text{m}^2.$$

Se usarán tubos de 8 × 8.

Exceso medio de temperatura entre el aire y el agua de refrigeración. Se supone que el agua entra a 18,3° y que sale a 22,8°, mientras que el aire, según hemos dicho, entra a $T_s = 28{,}8°$ y sale a $T_s = 23{,}2°$:

28,8	23,2
22,8	18,3
6,0	4,9

Exceso medio:

$$\Delta T = 5{,}45°.$$

Velocidad del agua. El agua se calienta 4,5° y debe absorber 48 171 kcal/h; luego su masa viene determinada por la condición:

$$m \cdot c \cdot 4{,}5 = 48\,171,\ \text{y como}\ c = 1,$$

$$m = \frac{48\,171}{4{,}5} = 10\,704\ \text{kg/h} = 10\,704\ \text{l/h}$$

o sea,

$$\frac{10\,704}{60} = 178{,}4\ \text{l/min},$$

y la potencia frigorífica dada por

$$\frac{Q}{t} = k \cdot s \cdot \Delta T \ \text{con}\ k = 158\ \text{Btu/p}^2 = 158 \times 2{,}7 = 426{,}6\ \text{kcal/m}^2$$

a, valdrá, teniendo en cuenta que $\Delta T = 4{,}5°$ y poniendo $s = as'$ con $s' = 64\ \text{m}^2$,

$$a = \frac{Q}{k \cdot s' \Delta T \times t} = \frac{48\,171}{426{,}6 \times 5{,}45 \times 64} = 3{,}3 \simeq 4$$

Deberán, pues, emplearse *cuatro* filas de tubos de 8 × 8.

Equivalencias entre fracciones de pulgadas y mm

Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros
0,001	0,025 4	0,01	0,254	0,1	2,54
0,002	0,050 8	0,02	0,508	0,2	5,08
0,003	0,076 2	0,03	0,762	0,3	7,62
0,004	0,101 6	0,04	1,016	0,4	10,16
0,005	0,127 0	0,05	1,270	0,5	12,70
0,006	0,152 4	0,06	1,524	0,6	15,24
0,007	0,177 8	0,07	1,778	0,7	17,78
0,008	0,203 2	0,08	2,032	0,8	20,32
0,009	0,228 6	0,09	2,286	0,9	22,86

Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros
1	25,4	26	660,4	51	1 295,4	76	1 930,4
2	50,8	27	685,8	52	1 320,8	77	1 955,8
3	76,2	28	711,2	53	1 346,2	78	1 981,2
4	101,6	29	736,6	54	1,371,6	79	2 006,6
5	127,0	30	762,0	55	1 397,0	80	2 032,0
7	177,8	32	812,8	57	1 447,8	82	2 082,8
8	203,2	33	838,2	58	1 473,2	83	2 108,2
9	228,6	34	863,6	59	1 498,6	84	2 133,6
10	254,0	35	889,0	60	1 524,0	85	2 159,0
11	279,4	36	914,4	61	1 549,4	86	2 184,4
12	304,8	37	939,8	62	1 574,8	78	2 209,8
13	330,2	38	965,2	63	1 600,2	88	2 235,2
14	355,6	39	990,6	64	1 625,6	89	2 260,6
15	381,0	40	1 016,0	65	1 651,0	90	2 286,0
16	406,4	41	1 041,4	66	1 676,4	91	2 311,4
17	431,8	42	1 066,8	67	1 701,8	92	2 336,8
18	457,2	43	1 092,2	68	1 727,2	93	2 362,2
19	482,6	44	1 117,6	69	1 752,6	94	2 387,6
20	508,0	45	1 143,0	70	1 778,0	95	2 413,0
21	533,4	46	1 168,4	71	1 803,4	96	2 438,4
22	558,8	47	1 193,8	72	1 828,8	97	2 463,8
23	584,2	48	1 219,2	73	1 854,2	98	2 489,2
24	609,6	49	1 244,6	74	1 879,6	99	2 514,6
25	635,0	50	1 270,0	75	1 905,0	100	2 540,0

Tabla de equivalencias entre pulgadas y mm.

Pulgadas		Milímetros
1/64″	0,015 625	0,396 875
1/32″	0,031 250	0,793 750
3/64″	0,046 875	1,190 625
1/16″	0,062 500	1,587 500
5/64″	0,078 125	1,984 375
3/32″	0,093 750	2,381 250
7/64″	0,109 375	2,778 125
1/8″	0,125 000	3,175 000
9/64″	0,140 625	3,571 875
5/32″	0,156 250	3,968 750
11/64″	0,171 875	4,365 625
3/16″	0,187 500	4,762 500
13/64″	0,203 125	5,159 375
7/32″	0,218 750	5,556 250
15/64″	0,234 375	5,953 125
1/4″	0,250 000	6,350 000
17/64″	0,265 625	6,746 875
9/32″	0,281 250	7,143 750
19/64″	0,296 875	7,540 625
5/16″	0,312 500	7,937 500
21/64″	0,328 125	8,334 375
11/32″	0,343 750	8,731 250
23/64″	0,359 375	9,128 125
3/8″	0,375 000	9,525 000
25/64″	0,390 625	9,921 875
13/32″	0,406 250	10,318 750
27/64″	0,421 875	10,715 625
7/16″	0,437 500	11,112 500
29/64″	0,453 125	11,509 375
15/32″	0,468 750	11,906 250
31/64″	0,484 375	12,303 125
1/2″	0,500 000	12,700 000

Pulgadas		Milímetros
33/64″	0,515 625	13,096 875
17/32″	0,531 250	13,493 750
35/64″	0,546 875	13,890 625
9/16″	0,562 500	14,287 500
37/64″	0,578 125	14,684 375
19/32″	0,593 750	15,081 250
39/64″	0,609 375	15,478 125
5/8″	0,625 000	15,875 000
41/64″	0,640 625	16,271 875
21/32″	0,656 250	16,668 750
43/64″	0,671 875	17,065 625
11/16″	0,687 500	17,462 500
45/64″	0,703 125	17,859 375
23/32″	0,718 750	18,256 250
47/64″	0,734 375	18,653 125
3/4″	0,750 000	19,050 000
49/64″	0,765 625	19,446 875
25/32″	0,781 250	19,843 750
51/64″	0,796 875	20,240 625
13/16″	0,812 500	20,637 500
53/64″	0,828 125	21,034 375
27/32″	0,843 750	21,431 250
55/64″	0,859 375	21,828 125
7/8″	0,875 000	22,225 000
57/64″	0,890 625	22,621 875
29/32″	0,906 250	23,018 750
59/64″	0,921 875	23,415 625
15/16″	0,937 500	23,812 500
61/64″	0,953 125	24,209 375
31/32″	0,968 750	24,606 250
63/64″	0,984 375	25,003 125
1″	1,000 000	25,400 000

ÍNDICE ALFABÉTICO

La Escuela del Radiotécnico

ENCICLOPEDIA PRÁCTICA
DE RADIOTECNIA APLICADA

Publicada bajo la dirección de **JOAQUÍN SÁNCHEZ-CORDOVÉS**
Ingeniero de Telecomunicación

VOLÚMENES QUE CONSTITUYEN LA OBRA

I. **Fundamentos de Radioelectricidad**, por JOAQUÍN SÁNCHEZ-CORDOVÉS, Ingeniero de Telecomunicación.

II. **Curso de Cine sonoro**, por EDUARDO GIL SANTIAGO, Licenciado en Ciencias Físicas, Ingeniero de Telecomunicación e Ingeniero de Servicio de la Western Electric Co. of Spain.

III. **Megafonía y Electroacústica**, por J. J. RAMIL DEL MORAL, Ingeniero de Telecomunicación.

IV. **El Oscilógrafo de Rayos catódicos y sus aplicaciones**, por EDUARDO GIL SANTIAGO, Licenciado en Ciencias Físicas, Ingeniero de Telecomunicación e Ingeniero de Servicio de la Western Electric Co. of Spain.

V. **La Radio en la Navegación aérea**, por CARLOS SANTIAGO LUQUE, Perito Industrial.

VI. **La Radio en la Navegación marítima**, por CARLOS SANTIAGO LUQUE, Perito Industrial.

VII. **Radiogoniometría**, por EMILIO FERNÁNDEZ CASADO, Ingeniero de Telecomunicación, y VALENTÍN QUINTAS CASTAÑS, Ingeniero de Telecomunicación.

VIII. **Receptores de Televisión**, por JOAQUÍN SÁNCHEZ-CORDOVÉS.

IX. **Reparación y ajuste de receptores**, por RAFAEL BURGUETE.

X. **Medidas en alta y baja frecuencia**, por ESTEBAN BENABARRE, Ingeniero de Telecomunicación.